



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# APLICACIÓN DE MÉTODOS PROBABILISTAS EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DEL DISTRITO DEL *EIXAMPLE* (BARCELONA)

Treball realitzat per:

**Cintia Sánchez Sanz**

Dirigit per:

**M<sup>a</sup> Nieves Lantada Zarzosa**

**Luis G. Pujades Beneit**

Màster en:

**Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica**

Barcelona, 21 de septiembre de 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría agradecer la ayuda y el apoyo a mis dos tutores del TFM, M<sup>a</sup> Nieves Lantada Zarzosa y Luis G. Pujades Beneit. Además de dirigirme y asesorarme en la realización de este trabajo, quiero destacar su dedicación durante todo el transcurso del máster.

Asimismo, me gustaría agradecer a Armando Aguilar Meléndez por su ayuda con el programa USERISK y con la metodología empleada.

Por último, quiero dar gracias a mi familia por facilitarme la oportunidad de seguir ampliando mis conocimientos con este máster.



## **RESUMEN**

El presente trabajo recoge la aplicación de la metodología LM1\_P en la evaluación del riesgo sísmico del distrito del *Eixample*, perteneciente a la ciudad de Barcelona. Esta metodología es una modificación de la metodología LM1 propuesta por el proyecto Risk-UE, otorgándole un enfoque probabilista. La metodología LM1\_P está implementada en un código de cómputo denominado USERISK 2011, herramienta que facilita y reduce considerablemente el tiempo de cálculo. Con este programa se obtienen funciones que representan la vulnerabilidad de los edificios mediante distribuciones de probabilidad. Asimismo, se obtienen curvas que representan las frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño sísmico, incorporando las incertidumbres asociadas a la estimación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios y a la peligrosidad sísmica de la zona de estudio.

Con las curvas de vulnerabilidad obtenidas del programa USERISK 2011, se ha estimado el daño físico en los edificios, los costes económicos y las pérdidas humanas para distintos percentiles y distintos grados de intensidad sísmica. En esta tesina se han elegido los percentiles del 16%, 50% y 84%, y los grados de intensidad V, VI, y VII, ya que son los grados de intensidad considerados más probables en la ciudad de Barcelona, que pueden provocar daños.

A pesar de que la ciudad está caracterizada con un nivel bajo o moderado de amenaza sísmica, se obtienen grados de daño significativos debido a la alta vulnerabilidad de los edificios del distrito de estudio (*Eixample*). Para un grado de intensidad VII y considerando una correcta definición de la tipología estructural (*Best*), se obtiene un índice de daño medio *leve* para el percentil 16, *moderado* para el percentil 50 y *severo* para el percentil 84. Consecuentemente, se obtiene un número de víctimas y unos costes económicos elevados, lo que supondría un largo periodo de recuperación en la ciudad.

Finalmente, todos los resultados obtenidos en cada barrio del distrito de estudio se han incorporado en un Sistema de Información Geográfica y representado mediante mapas. Esta información puede ser de gran ayuda para la organización de planes de emergencia y toma de decisiones para la reducción del riesgo.

## **ABSTRACT**

The seismic risk of the *Eixample* district in Barcelona is assessed by means of a new probabilistic method based on vulnerability indices and macroseismic intensities. The method adequately expands the so called level 1 method (LM1), as proposed in the Risk-UE project, to incorporate a probabilistic approach. USERISK 2011 is a computer code that allows applying this new method, called LM1\_P. Seismic hazard is defined by means of probabilistic annual exceedance rates as function of EMS'98 macroseismic intensities; buildings' vulnerability is defined through Beta probability distributions. Thus, the LM1-P method allows to take into account the uncertainties in the expected seismic actions and in the vulnerability.

The USERISK 2011 program allows to appraise the physical damage as well as the economic cost and casualties. In this work the 16, 50 and 84 percentiles have been estimated for V, VI and VII intensity grades. It is worth to mention that, for a 475 years return period, the macroseismic intensity foreseen for Barcelona in the Spanish seismic code is VI and that earthquake scenarios of intensities V, VI and VII were suggested by the civil protection services of the city.

In spite of the low-to-moderate seismic hazard, the expected damage is significant, due to the costly exposure and high vulnerability of the area. However, uncertainties are also noteworthy, because of unawareness in both, seismic hazard and vulnerability. For a VII intensity scenario and considering good data and information about the vulnerability (best estimate), *slight*, *moderate* and *heavy* damages states are obtained respectively for the 16, 50 and 84 percentiles. Accordingly, this scenario would produce an important economic cost, a high number of casualties, and would involve a long recovery time.

A Geographical Information System is then used to map the obtained results at district and neighborhood levels. Thus, the results of this work can be helpful for civil protection officers in order to take actions for seismic risk prevention and reduction, and for emergency planning.

---

# ÍNDICE

---

<b>LISTADO DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTADO DE TABLAS .....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1. Conceptos generales.....	15
1.2. Antecedentes .....	19
1.3. Motivación .....	22
1.4. Objetivos .....	23
1.5. Estructura de la memoria.....	24
<b>2. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO.....</b>	<b>26</b>
2.1. Peligrosidad sísmica.....	26
2.2. Vulnerabilidad sísmica.....	28
2.2.1. Índices de vulnerabilidad sísmica.....	28
2.2.2. Funciones de vulnerabilidad.....	36
2.3. Daño en los edificios .....	39
2.3.1. Matrices de probabilidad de daño .....	39
2.3.2. Curvas de fragilidad .....	41
2.4. Riesgo de daño físico .....	41
2.5. Costes económicos .....	42
2.6. Pérdidas humanas.....	44
<b>3. APLICACIÓN AL DISTRITO DEL <i>EIXAMPLE</i> .....</b>	<b>45</b>
3.1. Organización territorial de Barcelona .....	45
3.2. Geología de la ciudad de Barcelona .....	47
3.3. Sismicidad de Barcelona .....	48
3.4. Distrito del <i>Eixample</i> .....	49
3.4.1. Divisiones administrativas .....	49
3.4.2. Población.....	50
3.4.3. Edificios .....	52
<b>4. PROGRAMA USERISK 2011 .....</b>	<b>57</b>
4.1. Introducción de datos en el programa USERISK 2011.....	57
4.2. Resultados obtenidos con el programa USERISK 2011 .....	60
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
5.1. Vulnerabilidad sísmica.....	65

5.2.	Matrices de probabilidad de daño .....	69
5.3.	Riesgo sísmico .....	76
5.4.	Escenarios de riesgo sísmico .....	82
5.4.1.	Índice de daño medio .....	82
5.4.2.	Costes económicos .....	89
5.4.3.	Pérdidas humanas .....	97
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>105</b>
	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>108</b>
	<b>ANEXO I: Escala macrosísmica EMS-98</b>	
	<b>ANEXO II: Escenarios de riesgo sísmico para la curva <i>Lower</i></b>	
	<b>ANEXO III: Escenarios de riesgo sísmico para la curva <i>Upper</i></b>	



## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Elemento de los que depende el riesgo sísmico de una zona.....	17
<b>Figura 1.2.</b> Elemento de los que depende el riesgo de daño físico de un edificio.....	18
<b>Figura 2.1.</b> Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona empleada en el cálculo del riesgo sísmico (Aguilar, 2011). .....	27
<b>Figura 2.2.</b> Curvas de vulnerabilidad de un edificio obtenidas con la metodología LM1_P (Aguilar, 2011). .....	38
<b>Figura 3.1.</b> Mapa de Barcelona que muestra la división del territorio en distritos.....	45
<b>Figura 3.2.</b> Mapa geológico de la ciudad de Barcelona (Cid et al.,2001). .....	47
<b>Figura 3.3.</b> Mapa de la ciudad de Barcelona que muestra las distintas zonas sísmicas (Cid et al.,1999).....	48
<b>Figura 3.4.</b> Mapa del distrito del Eixample que muestra la división en ZRP de cada uno de los barrios pertenecientes al distrito.....	49
<b>Figura 3.5.</b> Mapa del distrito del Eixample que muestra la densidad de población en cada barrio. ....	51
<b>Figura 3.6.</b> Tipologías estructurales de los edificios pertenecientes al distrito del Eixample. ....	53
<b>Figura 3.7.</b> Altura media de los edificios localizados en cada barrio del distrito del Eixample. ....	53
<b>Figura 3.8.</b> Año de construcción de los edificios localizados en el distrito del Eixample. ....	54
<b>Figura 3.9.</b> Zonas sísmicas sobre las que se sitúa el distrito del Eixample. ....	55
<b>Figura 3.10.</b> Estado de conservación de los edificios localizados en el distrito del Eixample... ..	55
<b>Figura 4.1.</b> Variación de las curvas de vulnerabilidad al cambiar el valor del factor de fiabilidad. ....	59
<b>Figura 4.2.</b> Variación de las curvas que representan el riesgo sísmico al cambiar el valor del factor de fiabilidad. ....	60
<b>Figura 5.1.</b> Localización del edificio 1 dentro del distrito del Eixample (izquierda), su localización en la manzana (derecha) y fotografía de su fachada (derecha). ....	63
<b>Figura 5.2.</b> Localización del edificio 2 dentro del distrito del Eixample (izquierda), su localización en la manzana (derecha) y fotografía de su fachada (derecha). ....	64
<b>Figura 5.3.</b> Curvas de vulnerabilidad sísmica obtenidas para el edificio 1.....	66
<b>Figura 5.4.</b> Curvas de vulnerabilidad sísmica obtenidas para el edificio 2.....	66
<b>Figura 5.5.</b> Intervalo de confianza de la función de vulnerabilidad empleado para obtener distintas matrices de daño. ....	67

<b>Figura 5.6.</b> Límite superior (percentil del 84%) e inferior (percentil del 16%) del intervalo de confianza del índice de vulnerabilidad definido para el edificio 1 y para las tres curvas. ....	68
<b>Figura 5.7.</b> Límite superior (percentil del 84%) e inferior (percentil del 16%) del intervalo de confianza del índice de vulnerabilidad definido para el edificio 2 y para las tres curvas. ....	68
<b>Figura 5.8.</b> Curvas que representan el grado de daño medio en función de la intensidad en el edificio 1.....	70
<b>Figura 5.9.</b> Curvas que representan el grado de daño medio en función de la intensidad en el edificio 2.....	70
<b>Figura 5.10.</b> Representación de las matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de izquierda a derecha) del daño promedio en el edificio 1, considerando la curva que representa la mejor estimación (Best). Obtenidas con la distribución Binomial (arriba) y con la distribución Beta equivalente (abajo). ....	72
<b>Figura 5.11.</b> Representación de las matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de izquierda a derecha) del daño promedio en el edificio 2, considerando la curva que representa la mejor estimación (Best). Obtenidas con la distribución Binomial (arriba) y con la distribución Beta equivalente (abajo). ....	73
<b>Figura 5.12.</b> Curvas que representan las frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y los periodos de retorno correspondientes en el edificio 1.....	79
<b>Figura 5.13.</b> Curvas que representan las frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y los periodos de retorno correspondientes en el edificio 2.....	79
<b>Figura 5.14.</b> Grados de daño asociados a distintos periodos de retorno en el edificio 1.....	81
<b>Figura 5.15.</b> Grados de daño asociados a distintos periodos de retorno en el edificio 2.....	81
<b>Figura 5.16.</b> Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad V. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y la mejor estima del daño (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural. ....	83
<b>Figura 5.17.</b> Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VI. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y la mejor estima del daño (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural. ....	84
<b>Figura 5.18.</b> Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VII. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y la mejor estima del daño (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.....	85
<b>Figura 5.19.</b> Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad V. Empleando para su cálculo los índices de vulnerabilidad obtenidos por Lantada (2007).....	86
<b>Figura 5.20.</b> Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VI. Empleando para su cálculo los índices de vulnerabilidad obtenidos por Lantada (2007). ...	87
<b>Figura 5.21.</b> Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VII. Empleando para su cálculo los índices de vulnerabilidad obtenidos por Lantada (2007). ..	87

<b>Figura 5.22.</b> Escenario sísmico probabilista empleado por Lantada (2007) para el cálculo del índice de daño medio. ....	88
<b>Figura 5.23.</b> Índice de daño medio por zonas censales de Barcelona para un escenario sísmico probabilista (Lantada, 2007). ....	89
<b>Figura 5.24.</b> Representación de los costes debidos al daño estructural por barrio para un grado de intensidad V. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y el valor más probable (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.....	93
<b>Figura 5.25.</b> Representación de los costes debidos al daño estructural por barrio para un grado de intensidad VI. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y el valor más probable (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.....	94
<b>Figura 5.26.</b> Representación de los costes debidos al daño estructural por barrio para un grado de intensidad VII. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y el valor más probable (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.....	95
<b>Figura 5.27.</b> Comparación de los costes debidos al daño estructural obtenidos en este trabajo (arriba) con los obtenidos por Lantada (2007) (abajo).....	97
<b>Figura 5.28.</b> Estimación del número de fallecidos ocasionados por un terremoto de intensidad VII, que sucede durante el día. Para un valor de daño mínimo (arriba), medio (en medio) y máximo (abajo). ....	101
<b>Figura 5.29.</b> Estimación del número de fallecidos ocasionados por un terremoto de intensidad VII, que sucede durante la noche. Para un valor de daño medio.....	102
<b>Figura 5.30.</b> Estimación del número de heridos totales ocasionados por un terremoto de intensidad VII, que sucede durante el día. Para un valor de daño mínimo (arriba), medio (en medio) y máximo (abajo). ....	103

## **LISTADO DE TABLAS**

<b>Tabla 1.1.</b> Resumen de las principales características de las metodologías previas a la empleada en este trabajo para calcular el riesgo sísmico de una zona urbana.....	21
<b>Tabla 2.1.</b> Valores de la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona empleada en el cálculo del riesgo sísmico (Aguilar, 2011).....	28
<b>Tabla 2.2.</b> Índices de vulnerabilidad básicos para cada tipología estructural (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). ....	29
<b>Tabla 2.3.</b> Modificadores regionales del índice de vulnerabilidad según el período constructivo (Lantada, 2007). ....	30
<b>Tabla 2.4.</b> Modificador relacionado con la altura del edificio (Lantada, 2007). ....	31
<b>Tabla 2.5.</b> Modificador en relación al estado de conservación del edificio (Lantada, 2007). ....	32
<b>Tabla 2.6.</b> Modificador en relación a las irregularidades en planta (Lantada, 2007). ....	33
<b>Tabla 2.7.</b> Modificador relacionado con la diferencia en altura con los edificios adyacentes (Lantada, 2007). ....	33
<b>Tabla 2.8.</b> Modificador en relación a la posición que ocupa el edificio dentro de la manzana (Lantada, 2007). ....	34
<b>Tabla 2.9.</b> Estados de daño de las estructuras en el Método del Índice de Vulnerabilidad. ....	39
<b>Tabla 2.10.</b> Coste del daño causado por cada estado de daño <i>RCtk</i> . ....	43
<b>Tabla 3.1.</b> Organización territorial de Barcelona en distritos y barrios.....	46
<b>Tabla 3.2.</b> Zonas sísmicas en las que se divide la ciudad de Barcelona. ....	49
<b>Tabla 3.3.</b> División del distrito del Eixample en barrios y ZRP.....	50
<b>Tabla 3.4.</b> Densidad de población en los distritos en los que se divide Barcelona. ....	51
<b>Tabla 4.1.</b> Información sobre la curva de peligrosidad sísmica necesaria para que el programa USERISK 2011 estime el riesgo sísmico. ....	57
<b>Tabla 4.2.</b> Información sobre el edificio necesaria para que el programa USERISK 2011 estime la vulnerabilidad sísmica. ....	58
<b>Tabla 4.3.</b> Información que contiene el archivo con extensión “vull” generado con el programa USERISK 2011. ....	61
<b>Tabla 4.4.</b> Información que contiene el archivo con extensión “dam1” generado con el programa USERISK 2011. ....	62
<b>Tabla 5.1.</b> Características específicas de los edificios ejemplo. ....	64
<b>Tabla 5.2.</b> Parámetros de las funciones de probabilidad Beta para los edificios ejemplo. ....	67

<b>Tabla 5.3.</b> Valores de los índices de vulnerabilidad correspondientes al intervalo de confianza seleccionado para representar la vulnerabilidad en los dos edificios ejemplo. ....	69
<b>Tabla 5.4.</b> Índice de daño medio para todos los índices de vulnerabilidad considerados en los dos edificios y las intensidades V, VI y VII. ....	71
<b>Tabla 5.5.</b> Matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de abajo a arriba) del daño promedio en el edificio 1, considerando la curva que representa la mejor estimación (Best). Obtenidas con la distribución Binomial (izquierda) y con la distribución Beta equivalente (derecha). ....	74
<b>Tabla 5.6.</b> Matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de abajo a arriba) del daño promedio en el edificio 2, considerando la curva que representa la mejor estimación (Best). Obtenidas con la distribución Binomial (izquierda) y con la distribución Beta equivalente (derecha). ....	75
<b>Tabla 5.7.</b> Frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y periodos de retorno en el edificio 1. ....	77
<b>Tabla 5.8.</b> Frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y periodos de retorno en el edificio 2. ....	78
<b>Tabla 5.9.</b> Resultados del índice de daño medio por barrio para distintos grados de intensidad sísmica. ....	82
<b>Tabla 5.10.</b> Costes mínimos de rehabilitación, deterioro y totales en todos los barrios del distrito del Eixample y para distintos grados de intensidad, considerando una correcta definición de las tipologías estructurales de los edificios (Best- $\sigma$ ). ....	90
<b>Tabla 5.11.</b> Costes medios de rehabilitación, deterioro y totales en todos los barrios del distrito del Eixample y para distintos grados de intensidad, considerando una correcta definición de las tipologías estructurales de los edificios (Best). ....	91
<b>Tabla 5.12.</b> Costes máximos de rehabilitación, deterioro y totales en todos los barrios del distrito del Eixample y para distintos grados de intensidad, considerando una correcta definición de las tipologías estructurales de los edificios (Best+ $\sigma$ ). ....	92
<b>Tabla 5.13.</b> Cálculo del parámetro C para cada tipología estructural y cada barrio del distrito del Eixample, empleado en la estimación del número de víctimas. ....	98
<b>Tabla 5.14.</b> Cálculo del porcentaje de viviendas correspondientes a las tipologías de mampostería y hormigón armado, para la estimación del parámetro M1. ....	98
<b>Tabla 5.15.</b> Estimación del parámetro M1 para cada tipología estructural, empleado en el cálculo de víctimas. ....	99
<b>Tabla 5.16.</b> Parámetros M2, M3, M4 y M5 para cada tipología estructural, empleados en el cálculo de víctimas. ....	100

# 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, los sismos han destruido ciudades localizadas en todas partes del mundo, sufriendo un periodo de recuperación muy largo y costoso. Se sabe con certeza que seguirán ocurriendo sismos y que el comportamiento sismorresistente de los edificios no siempre es el adecuado. De modo que, es de vital importancia conocer lo mejor posible el tipo de daño que pueden sufrir los edificios habitados en la actualidad durante la ocurrencia de sismos futuros. Sin embargo, los resultados de este tipo de evaluaciones de riesgo tienen una gran incertidumbre.

En los últimos años, se ha incrementado el interés por el estudio del riesgo sísmico en zonas urbanas con un cierto nivel de amenaza sísmica, surgiendo diversas metodologías para su determinación. La elección de la metodología apropiada depende de diversos factores, entre los que destacan, la naturaleza del problema y el propósito del estudio (Coburn y Spence, 2002). Con estos estudios es posible estimar el grado de daño en los edificios, los costes económicos y las pérdidas humanas derivadas del desastre sísmico, siendo posible reducir estos efectos aplicando medidas de mitigación. Asimismo, disponer de escenarios de riesgo sísmico de una zona urbana, permite crear medidas de mitigación o reducción, así como planes de emergencia ante el posible desastre. Con estos estudios es posible detectar aquellos lugares donde se localizan los edificios más vulnerables, los cuales requerirán mayor atención. Para obtener los escenarios de riesgo sísmico se emplean cada vez más los Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerándose una herramienta muy útil para gestionar y representar mediante mapas, gran cantidad de información contenida en una base de datos.

En el presente capítulo se revisan algunos conceptos relacionados con la Ingeniería Sísmica que se repiten continuamente a lo largo de todo el trabajo. Además, se repasan algunas de las metodologías existentes para el cálculo del riesgo sísmico, explicando más detalladamente la empleada en este trabajo. Por último, se comentan los objetivos y las motivaciones, y se explica la estructura de la memoria

## 1.1. Conceptos generales

Algunos de los conceptos básicos, necesarios para comprender el análisis llevado a cabo en el presente trabajo, son los siguientes:

### ***PELIGROSIDAD SÍSMICA***

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de que el valor de un cierto parámetro que mide el movimiento del suelo (intensidad, aceleración, etc.) sea excedido en una determinada zona y en un cierto periodo de tiempo, llamado periodo de retorno. Este elemento varía según la magnitud de los sismos en la zona de estudio, de la distancia a la fuente sísmica y de los efectos de sitio, que dependen del tipo de suelo sobre el que se asientan las estructuras (arcillas, arenas, etc.).

Para caracterizar el movimiento del suelo se pueden emplear distintos parámetros, como el PGA (aceleración máxima o aceleración pico horizontal), la intensidad macrosísmica, la intensidad de Arias o el PSA (aceleración espectral). En este trabajo se ha empleado la intensidad macrosísmica en la escala EMS-98 (ver anexo I).

La peligrosidad sísmica se puede obtener mediante métodos deterministas o probabilistas:

- Método determinista (DSHA, *Deterministic Seismic Hazard Analysis*): este método se suele basar en terremotos históricos, es decir, se supone que los terremotos futuros se producirán de una forma análoga a como lo hicieron en el pasado. Para la estimación de la peligrosidad, se toma uno o varios terremotos del catálogo sísmico y se aplica un modelo de atenuación de la intensidad con la distancia. Normalmente se suele elegir el terremoto de mayor intensidad, ya que se supone que representa el límite superior del movimiento. Como resultado, se obtiene el movimiento del suelo generado por el terremoto de referencia.
- Método probabilista (PSHA, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*): este método combina las contribuciones al movimiento del suelo de todos los terremotos de todas las magnitudes posibles, a todas las distancias significativas del lugar de interés, y teniendo en cuenta su frecuencia de ocurrencia. Como resultado, se obtiene la tasa de excedencia de un cierto nivel de movimiento del suelo.

Para poder realizar el análisis de riesgo sísmico de forma probabilista, necesariamente, se debe emplear el método probabilista en la determinación de la peligrosidad sísmica.

- ***VULNERABILIDAD SÍSMICA***

La vulnerabilidad sísmica es la cuantificación del daño que se espera sufra una determinada estructura al verse sometida al movimiento del suelo producido por un sismo. En esta definición se relaciona la vulnerabilidad con el grado de daño generado por el sismo. Sin embargo, aunque ambos conceptos están estrechamente relacionados, la vulnerabilidad se puede definir como una característica intrínseca de la estructura, que sólo depende de las características de la misma, y no del terreno sobre el que se asienta.

No obstante, la peligrosidad sísmica depende de las características del movimiento del suelo, mientras que la vulnerabilidad sísmica varía en función de la calidad y métodos constructivos de las estructuras situadas dentro de la zona de estudio. De tal forma, que la única manera de mitigar el riesgo sísmico en una zona urbana, es reducir la vulnerabilidad de las estructuras. En la actualidad, hay una tendencia a aumentar la vulnerabilidad sísmica debido a la gran concentración de población expuesta, a la construcción en lugares no adecuados y a la subestimación del riesgo sísmico. Por otra parte, esta vulnerabilidad disminuye debido a las mejoras en los materiales y a los avances en las técnicas constructivas.

En esta tesina interesa evaluar el riesgo sísmico de forma probabilista. Para que sea posible, tanto la peligrosidad sísmica como la vulnerabilidad deben expresarse en términos probabilistas. La metodología empleada en este trabajo permite definir la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante distribuciones de probabilidad.

- ***DAÑO SÍSMICO***

El daño sísmico se define como los daños físicos esperado en una estructura de una determinada vulnerabilidad, al verse sometida al movimiento del terreno generado por un sismo.

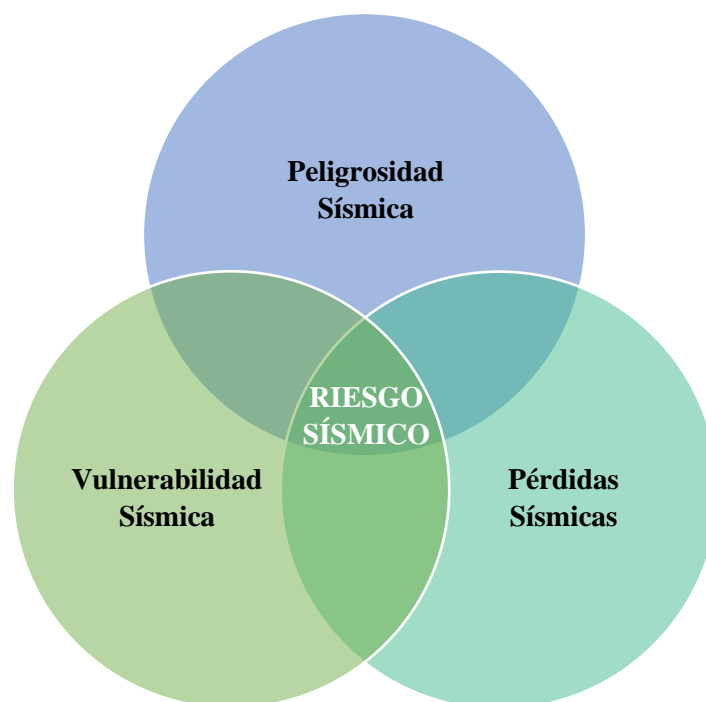


- **PÉRDIDAS SÍSMICAS**

Las pérdidas sísmicas se definen como la valoración de los costes materiales y las pérdidas humanas debidas a la ocurrencia de un sismo. Estas pérdidas dependen de la vulnerabilidad de las edificaciones e infraestructuras, aumentando con el comportamiento poco adecuado o ineficaz de las mismas.

- **RIESGO SÍSMICO**

El riesgo sísmico se puede definir como la probabilidad de que las consecuencias sociales o económicas generadas por la ocurrencia de un sismo, iguallen o excedan unos ciertos valores predefinidos en un área geográfica concreta. A su vez, este término se puede expresar como la convolución en el tiempo de tres elementos: Peligrosidad sísmica, Vulnerabilidad sísmica y Pérdidas (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Componentes de los que depende el riesgo sísmico de una zona.

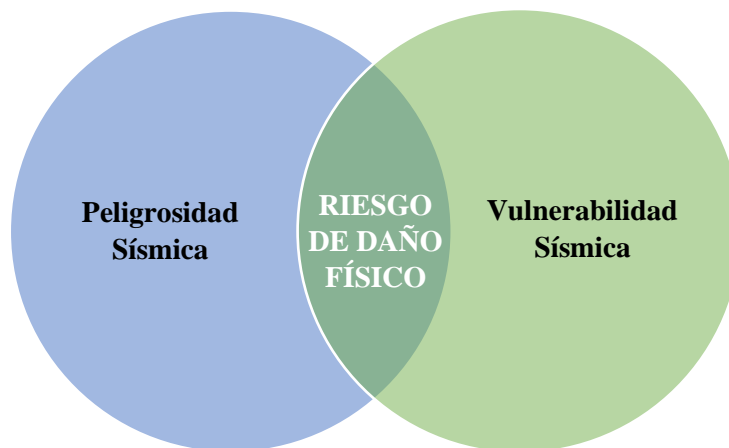
Diversos autores, como UNDRO (1979), FEMA (2000), Giovinazzi (2005), han dado definiciones similares para el término de riesgo. Varnes (1984) define el riesgo en sentido estricto ( $R_s$ ) y en sentido global ( $R_t$ ). En sentido estricto, lo define como el grado de pérdidas esperadas en un determinado elemento debidas a un fenómeno natural específico de una magnitud particular y en un período de exposición determinado.

Expresándose mediante la convolución de la peligrosidad ( $H$ , *Hazard*) y la vulnerabilidad ( $V$ ) del elemento expuesto ( $E$ ) (expresión 1.1). En sentido global, lo define como la valoración global de las consecuencias del evento en el sector analizado, en función de la pérdida de vidas humanas, heridos, propiedades dañadas, o perturbación de la actividad económica como consecuencia de un determinado fenómeno natural. Se calcula como la convolución entre el riesgo en sentido estricto ( $R_s$ ) y los elementos de riesgo ( $E$ ) (expresión 1.2).

$$R_s = (H) \otimes (V) \quad (1.1)$$

$$R_t = (E) \otimes (R_s) = (E) \otimes (H) \otimes (V) \quad (1.2)$$

Es bastante habitual expresar el riesgo sísmico en función de la peligrosidad del área de estudio y de la vulnerabilidad de los edificios (expresión 1.1), es decir, sin considerar las pérdidas ocasionadas (Figura 1.2). Debido a que éstas se consideran implícitas en el concepto de vulnerabilidad (Lantada, 2007). A este término se le ha dado el nombre de riesgo de daño físico, y se define como la probabilidad de que se alcance o exceda un determinado nivel de daño físico en un edificio, debido a la posible ocurrencia de eventos peligrosos durante un periodo específico (Aguilar, 2011). Por otro lado, es común que el riesgo de daño físico en edificios se exprese en términos de frecuencias de excedencia de estados de daño físico (FEMA, 2009).



**Figura 1.2.** Elemento de los que depende el riesgo de daño físico de un edificio.

Como se ha comentado anteriormente, para realizar un análisis del riesgo sísmico de forma probabilista, todos los elementos que intervienen en su cálculo se deben obtener mediante métodos probabilistas (peligrosidad sísmica y vulnerabilidad).

## 1.2. Antecedentes

Se han empleado diversas metodologías durante las últimas décadas para estimar el riesgo sísmico en zonas urbanas. Algunas de las metodologías más relevantes definidas en diferentes proyectos son: ATC-13, ATC-25, HAZUS'99 y Risk-UE. Sus principales características se recogen en la Tabla 1.1.

Entre los distintos métodos se distinguen principalmente dos tipos, los conocidos como Métodos del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y los Métodos del Espectro de Capacidad (MEC). Los primeros son métodos uniparamétricos, es decir, cuantifican la acción sísmica mediante un solo parámetro, que suele ser la intensidad macrosísmica. Mientras que los segundos son multiparamétricos, representan la acción sísmica mediante espectros de demanda y la resistencia sísmica del edificio mediante espectros de capacidad. Los métodos multiparamétricos no se deben emplear en zonas con escasez de datos de aceleración o en zonas con un elevado número de edificios, en tal caso es aconsejable emplear métodos basados en la intensidad.

Las metodologías de los proyectos ATC-13 y ATC-25 son dos ejemplos de métodos que cuantifican la acción sísmica de forma uniparamétrica, empleando la intensidad macrosísmica en la escala Mercalli Modificada (MM). El proyecto ATC-13 se desarrolla para estimar el daño físico directo y las pérdidas de origen sísmico en construcciones de California, en Estados Unidos (ATC-13, 1985). La metodología recogida en este informe, emplea dos tipos de clasificaciones para identificar a las construcciones. La primera clasificación divide las construcciones en diferentes tipos desde el punto de vista de la Ingeniería Sísmica, y la segunda divide las construcciones según el uso o función social de las mismas. El proyecto ATC-25 surge años más tarde, con el objetivo de estimar el riesgo sísmico de las líneas vitales de Estados Unidos (ATC-25, 1991). Ambas metodologías emplean el método Delphi para obtener las matrices de probabilidad de daño, basado en la opinión de personas expertas. Sin embargo, el proyecto ATC-13 divide el daño en siete estados de daño, mientras que el proyecto ATC-25 lo divide en cuatro estados de daño.

El proyecto HAZUS'99 surge con el objetivo de emplear nuevas metodologías en el cálculo del riesgo sísmico de algunas zonas de Estados Unidos. Emplea un método multiparamétrico, el conocido como Método del Espectro de Capacidad (MEC), el cual permite modelar el riesgo sísmico empleando la intersección entre espectros de

demanda y de capacidad. Este método otorga un espectro de respuesta a cada Matriz Tipológica de Edificios, empleando la clasificación de edificios definida por FEMA (1992).

Al mismo tiempo, el proyecto Risk-UE propuso en Europa dos metodologías (LM1 y LM2), definidas para calcular el riesgo sísmico en ciudades europeas. La metodología LM1 emplea el Método del Índice de Vulnerabilidad, cuyo parámetro empleado para caracterizar la amenaza sísmica es la intensidad macrosísmica en la escala EMS-98. Por otro lado, para representar la vulnerabilidad sísmica de los edificios emplea unos índices de vulnerabilidad, cuyos valores están comprendidos entre 0 y 1, y varían en función de la tipología estructural y de las características propias de cada edificio (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). El daño medio esperado en la estructura se calcula con una función que depende del índice de vulnerabilidad y del grado de intensidad macrosísmica. Finalmente, divide el daño en seis estados de daño, desde el daño nulo hasta la destrucción (Tabla 1.1).

Sin embargo, la metodología LM2 emplea el Método del Espectro de Capacidad (MEC) para modelar el riesgo sísmico, al igual que HAZUS'99. La peligrosidad sísmica se representa mediante espectros de respuesta lineal con un amortiguamiento del 5%. Mientras que la vulnerabilidad sísmica de las estructuras se representa mediante espectros de capacidad. Por otro lado, el daño esperado en las estructuras se representa mediante funciones de daño, llamadas curvas de fragilidad. Estas curvas expresan las probabilidades de que los diferentes estados de daño sean excedidos en la estructura en función del desplazamiento espectral del edificio. La clasificación de los edificios se basa en la considerada en el proyecto HAZUS'99, pero adaptándola a las características de los edificios de Europa.

**Tabla 1.1.** Resumen de las principales características de las metodologías previas a la empleada en este trabajo para calcular el riesgo sísmico de una zona urbana.

	ATC-13	ATC-25	HAZUS'99	Risk-UE	
				Metodología LM1	Metodología LM2
<b>Año de publicación</b>	1985	1991	2003	2001-2004	
<b>Objetivo</b>	Estimar daño físico y las pérdidas en construcciones localizadas en California (Estados Unidos) debidas a la ocurrencia de un sismo.	Estimar el riesgo sísmico de las líneas vitales de Estados Unidos.	Emplear nuevas metodologías en el cálculo del riesgo sísmico de alguna zona de Estados Unidos	Estimar el riesgo sísmico en ciudades europeas.	
<b>Zona de aplicación</b>	California (Estados Unidos)	Estados Unidos	Estados Unidos	Europa	
<b>Escala de intensidad macrosísmica</b>	MM	MM	MM	EMS-98	
<b>Clasificación de estructuras</b>	1ª clasificación: 40 clases de edificios y 38 clases de otros tipos de estructuras.  2ª clasificación: 35 clases de usos o funciones sociales.	5 líneas vitales (transportes, sistemas de agua, sistemas de energía eléctrica, combustibles y gas natural y servicios de emergencia)	1ª clasificación: 36 tipologías estructurales.  2ª clasificación: 34 clases de usos o funciones sociales.	65 tipologías de edificios (23 clases principales de edificios y 3 clases de altura)	
<b>Tipo de método</b>	Uniparamétrico	Uniparamétrico	Multiparamétrico	Uniparamétrico	Multiparamétrico
<b>Estados de daño</b>	1- Nulo 2- Leve 3- Ligero 4- Moderado 5- Severo 6- Grave 7- Colapso	1- Ligero 2- Moderado 3- Fuerte 4- Mayor a destrucción	1- Leve 2- Moderado 3- Extensivo 4- Completo	0- Nulo 1- Ligero 2- Moderado 3- Substantial a fuerte 4- Muy fuerte 5- Destrucción	0- Nulo 1- Menor 2- Moderado 3- Severo 4- Colapso

En Barcelona, la ocurrencia en 1995 de un terremoto de una magnitud moderada, no mayor a 4,3, y sentido en esta ciudad con una intensidad IV en la escala MSK, provocó la alarma en la población. Desde este hecho, se han realizado numerosos estudios para determinar el riesgo sísmico en la ciudad. El presente trabajo se basa en la metodología definida por Aguilar (2011), metodología LM1\_P, la cual es una modificación de algunos aspectos de la metodología LM1 definida en el proyecto Risk-UE, otorgándole un enfoque más probabilista. Esta metodología LM1\_P (Aguilar, 2011) se describe con detalle en el capítulo 2. No obstante, se destacan a continuación las novedades más importantes que introduce:

- 1) La peligrosidad sísmica es analizada de manera probabilista. Se obtienen curvas de peligrosidad sísmica que expresan las frecuencias anuales de excedencia de intensidades macrosísmicas.
- 2) Se define la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante distribuciones de probabilidad, que describen la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad tome ciertos valores.
- 3) Se obtienen curvas de frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño sísmico, que permiten incorporar incertidumbres asociadas a la estimación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios y de la peligrosidad sísmica de la zona de estudio.

Esta metodología está implementada en un código de cómputo, llamado USERISK, el cual permite sistematizar el proceso de análisis. En el presente trabajo se ha empleado la versión de este programa creada en el año 2011 (USERISK 2011), sin embargo, actualmente se está trabajando en una nueva versión.

### **1.3. Motivación**

Hasta la fecha, se han realizado numerosos estudios de riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona, sin embargo, en la mayoría de ellos, los estudios se realizan de forma determinista. Normalmente, se emplean los escenarios de riesgo sísmico para una probabilidad de excedencia del 50%. Este trabajo surge con la intención de aplicar una metodología que permita obtener escenarios de riesgo sísmico para distintos percentiles.

Se ha elegido la metodología LM1\_P ya que permite representar la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante distribuciones de probabilidad. De tal forma que es posible obtener los índices de vulnerabilidad de los edificios correspondientes a cada percentil. Y, por consiguiente, es posible calcular los distintos parámetros representados en los escenarios de riesgo sísmico empleando los índices de vulnerabilidad correspondientes a cada percentil.

Aunque Barcelona tiene una probabilidad de ocurrencia de un sismo destructivo bastante baja, el riesgo sísmico en esta ciudad no es despreciable. Esto se debe a la población expuesta, a las prácticas constructivas de sus edificios y a otras características que definen a la ciudad. Por este motivo, se ha seleccionado uno de los distritos en los que se divide la ciudad, el distrito del *Eixample*.

#### **1.4. Objetivos**

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el riesgo sísmico de los edificios residenciales del distrito del *Eixample*, perteneciente a la ciudad de Barcelona. Se pretende aplicar para ello una modificación de la metodología LM1 propuesta en el proyecto Risk-UE, la cual le da un enfoque más probabilista. Con este método, se busca estimar el riesgo sísmico del distrito de estudio en función de la frecuencia anual de excedencia del daño sísmico. Además, es posible considerar las incertidumbres que vienen asociadas al cálculo de la vulnerabilidad y de la peligrosidad sísmica, y como consecuencia, al riesgo de daño físico.

Como novedad, se pretende representar las funciones de daño sísmico considerando las incertidumbres derivadas de la estimación del grado de daño medio. Asimismo, se tendrán en cuenta estas incertidumbres en la estimación de los costes y pérdidas humanas ocasionadas por un sismo de una determinada intensidad.

Como objetivos específicos de este trabajo se pueden enumerar los siguientes:

- 1) Investigar sobre los distintos métodos existentes para el análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas, comparando sus características con la metodología empleada.

- 2) Asimilar la metodología elegida, aprendiendo, a su vez, el manejo del programa USERISK 2011. Este programa se emplea como herramienta básica para la obtención del riesgo sísmico de acuerdo a la metodología LM1\_P.
- 3) Ordenar y depurar la base de datos con las características específicas de cada edificio de la zona de estudio.
- 4) Preparar los ficheros de entrada necesarios para la obtención de los resultados deseados con el programa USERISK 2011.
- 5) Calcular las distribuciones de probabilidad de daño de todos los edificios de la zona de estudio para distintos niveles de la acción sísmica, considerando las incertidumbres en la obtención del índice de daño medio. Se creará un programa en Matlab para obtenerlas.
- 6) Calcular los costes económicos y las pérdidas humanas derivadas de la ocurrencia de sismos de distintos grados de intensidad. Al igual que en el punto anterior, se tendrán en cuenta las incertidumbres asociadas a la determinación del índice de daño medio. Se creará un programa en Matlab para realizar estos cálculos.
- 7) Obtener los escenarios de riesgo sísmico empleando un Sistema de Información Geográfica (SIG). En esta ocasión, se empleará el programa ArcGIS.
- 8) Comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos en trabajos anteriores.

## **1.5. Estructura de la memoria**

En el capítulo 2 de la memoria se recoge la metodología empleada en la evaluación del riesgo sísmico. Se exponen todos los pasos seguidos en la determinación de la peligrosidad sísmica, vulnerabilidad sísmica, daño físico en los edificios, frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño, costes económicos y, por último, pérdidas humanas.

En el siguiente capítulo (capítulo 3) se recogen las principales características de la zona urbana de estudio, tanto la organización territorial como la geología y sismicidad de Barcelona. Asimismo, se explican las divisiones administrativas del distrito de estudio y la distribución de la población dentro del mismo. Por último, se especifica la



información conocida de cada uno de los edificios pertenecientes al distrito, señalando la fuente de procedencia de estos datos.

El cuarto capítulo trata del código de cómputo USERISK 2011. En este capítulo se especifica el formato y orden de los datos de entrada, y se explican los archivos de salida obtenidos del programa.

En el apartado 5 se recogen los resultados obtenidos del análisis de riesgo sísmico en dos edificios ejemplo y, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para todos los edificios de estudio mediante mapas.

En el último capítulo se exponen las principales conclusiones y recomendaciones que se derivan de este trabajo.

Finalmente, se ha incluido como primer anexo una explicación de la escala de intensidad macrosísmica empleada para caracterizar el movimiento del suelo (EMS-98). Por otro lado, los anexos I y II recogen los escenarios de riesgo sísmico correspondientes a una tipología estructural menos y más vulnerable, respectivamente, a la definida. Para realizar estas representaciones se han empleado distintos percentiles (16%, 50%, 84%) y distintos grados de intensidad sísmica (V, VI, VII).

## 2. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

En este apartado se explica el procedimiento seguido para la obtención de la peligrosidad sísmica del lugar de estudio, la vulnerabilidad sísmica de los edificios, el daño ocasionado en las estructuras, las frecuencias de excedencia anuales de los estados de daño, los costes económicos y las pérdidas humanas ocasionadas por la ocurrencia de un determinado sismo.

### 2.1. Peligrosidad sísmica

Al contrario de lo ocurre en los estudios deterministas, el análisis probabilista de la Peligrosidad Sísmica (PSHA) combina las contribuciones al movimiento del suelo de todas las magnitudes, a todas las distancias significativas del lugar de estudio, y teniendo en cuenta su frecuencia de ocurrencia. Como resultado, se obtiene una curva de peligrosidad sísmica del lugar de estudio, la cual representa la tasa de excedencia anual en función de los valores del parámetro seleccionado para caracterizar la acción sísmica.

No obstante, para representar correctamente la peligrosidad sísmica de forma probabilista, se deben tener en cuenta las incertidumbres asociadas al conocimiento de los datos de partida. Esto se resuelve sumando y restando  $\sigma$  a la curva que representa la media. De tal forma que la peligrosidad sísmica queda representada mediante tres curvas.

La curva de peligrosidad sísmica puede obtenerse mediante el programa CRISIS. Este programa emplea la expresión 2.1 para obtener la frecuencia anual de excedencia de un cierto valor de intensidad sísmica ( $\gamma(I^*)$ ).

$$\gamma(I^*) = \sum_{i=1}^N \lambda_{o_i} \int_{M_{min_i}}^{M_{max_i}} \int_R P[I > I^* | M, R] \cdot f_{M_i}(M) \cdot f_{R_i}(R) \cdot dM \cdot dR \quad (2.1)$$

Donde:

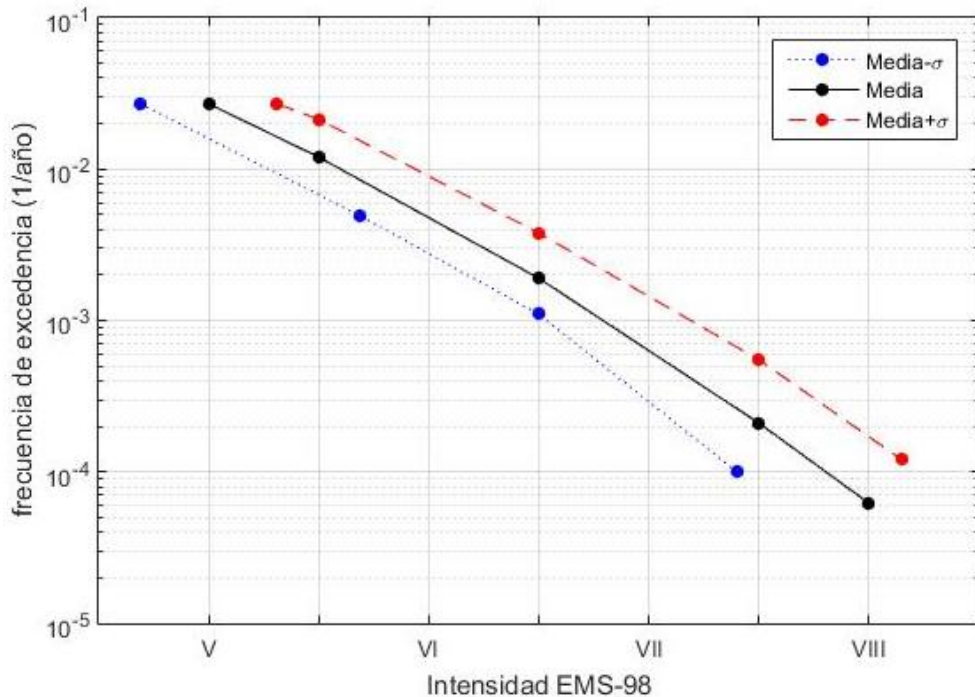
$\lambda_{o_i}$  es la tasa anual de excedencia de los sismos en la fuente  $i$ ,  $P[I > I^* | M, R]$  es la probabilidad de que un sismo de magnitud  $M$  y a una distancia  $R$  del lugar de estudio

exceda el valor de  $I^*$ ,  $f_{M_i}(M)$  y  $f_{R_i}(R)$  son las funciones de densidad de probabilidad de magnitud y de distancia,  $N$  es el número de fuentes sísmicas y, por último,  $M_{max}$  y  $M_{min}$  son las magnitudes máxima y mínima que puede generar la fuente.

Para determinar la función de densidad de probabilidad de magnitud, se supone que la magnitud sigue la ley de recurrencia Gutenberg-Richter. Y la ocurrencia de sismos es representada matemáticamente mediante la distribución de Poisson.

Por último, la probabilidad de que un sismo de una cierta magnitud  $M$  y a una distancia  $R$  del lugar de estudio exceda un determinado valor de  $I^*$  se obtiene mediante una ley de atenuación.

Para llevar a cabo este trabajo, se han empleado las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Aguilar (2011) a partir de las estimadas por Secanell et al (2004). Como parámetro que caracteriza el movimiento del suelo se ha elegido la intensidad. Los valores de los puntos que representan las curvas de peligrosidad sísmica en Barcelona (Figura 2.1) se recogen en la Tabla 2.1.



**Figura 2.1.** Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona empleada en el cálculo del riesgo sísmico (Aguilar, 2011).

**Tabla 2.1.** Valores de la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona empleada en el cálculo del riesgo sísmico (Aguilar, 2011).

	Frecuencia de excedencia (1/año)	Intensidad
<b>Media-<math>\sigma</math></b>	0,027	4,69
	0,0049	5,69
	0,0011	6,5
	0,0001	7,4
<b>Media</b>	0,027	5
	0,012	5,5
	0,0019	6,5
	0,00021	7,5
	0,000062	8
<b>Media+<math>\sigma</math></b>	0,027	5,31
	0,0213	5,5
	0,00378	6,5
	0,00055	7,5
	0,00012	8,15

## 2.2. Vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica de cada uno de los edificios pertenecientes a la zona urbana de estudio, se caracteriza mediante unos índices de vulnerabilidad sísmica cuyos valores varían en función de la tipología estructural del edificio y de sus características propias.

Sin embargo, los índices de vulnerabilidad representan la vulnerabilidad del edificio de manera determinista. Para representar la vulnerabilidad del edificio de forma probabilista se emplean las funciones de vulnerabilidad, que representan la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad tome ciertos valores.

### 2.2.1. Índices de vulnerabilidad sísmica

El Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV), empleado para determinar la vulnerabilidad de los edificios, establece unos índices básicos de vulnerabilidad en función de la tipología estructural del edificio (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Índices de vulnerabilidad básicos para cada tipología estructural (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Tipología	Descripción	Índices de Vulnerabilidad Básicos				
		$V_I^{min}$	$V_I^-$	$V_I^*$	$V_I^+$	$V_I^{max}$
<b>M1.1</b>	Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada	0,62	0,81	0,873	0,98	1,02
<b>M1.2</b>	Muros de carga con mampostería de piedra tallada	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
<b>M1.3</b>	Muros de carga con mampostería de sillería	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
<b>M3.1</b>	Mampostería no reforzada con forjados de madera	0,460	0,650	0,740	0,830	1,020
<b>M3.2</b>	Muros de carga con mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería (se diferencian por el período de construcción)	0,460	0,650	0,776	0,953	1,020
<b>M3.3</b>	Mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería	0,460	0,527	0,704	0,830	1,020
<b>M3.4</b>	Mampostería no reforzada con forjados de losas de hormigón	0,300	0,490	0,616	0,793	0,860
<b>RC1</b>	Estructuras de hormigón resistentes al momento	-0,02	0,047	0,442	0,8	1,02
<b>RC2</b>	Muros de cortante de hormigón	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
<b>RC3.2</b>	Estructuras de hormigón irregulares con muros de relleno de mampostería no reforzada	0,060	0,127	0,522	0,880	1,020
<b>RC4</b>	Sistemas duales, muros y pórticos de hormigón armado	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
<b>RC6</b>	Sistema de pórticos, placas de forjado y plafones auto portantes de hormigón prefabricado	0,3	0,367	0,544	0,67	0,86
<b>S1</b>	Estructuras metálicas resistentes al momento	-0,020	0,467	0,363	0,640	0,860
<b>S3</b>	Estructuras metálicas con relleno de mampostería	0,140	0,330	0,484	0,640	0,860
<b>S5</b>	Sistemas mixtos, de metal y hormigón armado	-0,020	0,257	0,402	0,720	1,020
<b>W</b>	Estructuras de madera	0,140	0,207	0,447	0,640	0,860

$V_I^*$  representa a los valores más probables del índice de vulnerabilidad básico. Estos valores están comprendidos entre 0 y 1, siendo los más próximos a 1 los correspondientes a los edificios más vulnerables y los próximos a 0 los construidos con un alto grado de protección sísmica. Mientras que  $V_I^-$  y  $V_I^+$  representan al intervalo

plausible y  $V_I^{min}$  y  $V_I^{max}$  a los límites inferior y superior, respectivamente, del índice de vulnerabilidad.

Para obtener el índice de vulnerabilidad de una estructura, se selecciona el valor más probable del índice de vulnerabilidad básico y se le aplican modificadores regionales y de comportamiento (expresión 2.2). Los modificadores permiten realizar un análisis de vulnerabilidad que tenga en cuenta las características específicas del edificio de estudio.

$$V_I = V_I^* + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (2.2)$$

En primer lugar, es de notable importancia destacar que los modificadores aplicados en este trabajo son los recogidos por Lantada (2007).

### **Modificadores regionales, $\Delta M_R$ :**

Los modificadores regionales adaptan el índice de vulnerabilidad a las características propias de la región y son fijados de forma experimental. En la Tabla 2.3 se recogen los modificadores regionales definidos para la ciudad de Barcelona en función de la tipología estructural del edificio (mampostería y hormigón), el periodo constructivo, la existencia de norma constructiva sismorresistente y de su obligatoriedad.

**Tabla 2.3.** *Modificadores regionales del índice de vulnerabilidad según el período constructivo (Lantada, 2007).*

Períodos	Período construcción	Normativas Españolas	Obligación en Barcelona	Práctica constructiva con refuerzos laterales	Nivel de diseño sísmico	Índice de Vulnerabilidad ( $V_I$ )				
						M31	M32	M33	M34	RC32
<b>I</b>	<1940	-	-	Ausente	No	0,198	0,162	0,234	-	-
<b>II</b>	1941-1962	-	-	Deficiente	No	0,135	0,099	0,171	-	-
<b>III</b>	1963-1968	Recomendación MV-101 (1962)	No especificado	Deficiente	No	0,073	0,037	0,109	0,134	0,228
<b>IV</b>	1969-1974	Normativa sísmica PGS-1 (1968)	Si	Aceptable	Bajo	0,010	-0,026	0,046	0,009	0,103
<b>V</b>	1975-1994	Normativa sísmica PDS (1974)	Si	Aceptable	Bajo	-0,052	-0,088	-0,016	-0,053	-0,022
<b>VI</b>	1995-1996	Normativa sísmica NCSE-94 (1995)	No	Aceptable	Bajo	-0,052	-0,088	-0,016	-0,053	-0,022

**Modificadores del comportamiento,  $\Delta M_c$ :**

Hay distintos modificadores del comportamiento del edificio en función de las características propias del mismo y de la posición que ocupa. En primer lugar, se explican los modificadores del comportamiento aplicados en el presente trabajo e implementados en el programa USERISK 2011. Estos modificadores están relacionados con el número de plantas, el estado de conservación, la irregularidad en planta, la diferencia de altura con los edificios adyacentes y la posición que ocupa el edificio en la manzana.

Además, existen otros modificadores del comportamiento que, por el momento, no están implementados en el programa USERISK 2011.

- **Modificador relacionado con el número de plantas,  $M_h$**

El modificador relacionado con el número de plantas varía dependiendo de la tipología estructural (mampostería u hormigón armado) y de la altura (bajo, medio o alto). En la Tabla 2.4 se recogen los valores empleados.

**Tabla 2.4.** Modificador relacionado con la altura del edificio (Lantada, 2007).

Tipología	Nº plantas	Modificadores $M_h$	
		Edificios de 1940 o anteriores	Edificios posteriores a 1940
<b>Mampostería</b>	Bajo (1 a 2)	-0,02	-0,04
	Medio (3 a 5)	+0,02	0
	Alto (6 o más)	+0,06	+0,04
<b>Hormigón (Nivel de diseño bajo)</b>	Bajo (1 a 3)	-0,04	
	Medio (4 a 7)	0	
	Alto (8 o más)	+0,08	

A los edificios con estructura metálica (S1, S3, S5) se les aplica los modificadores correspondientes a los edificios de hormigón, y a los edificios con estructura de la madera (W), los correspondientes a los edificios de mampostería.

- **Modificador relacionado con el estado de conservación,  $M_{ec}$**

Se debe aplicar un modificador en relación al estado de conservación del edificio (Tabla 2.5), penalizando a aquellos edificios en los que haya algún desperfecto en la estructura o se detecte algún error o irregularidad en el proceso constructivo. Para aplicar este modificador, los edificios se clasifican en tres grupos: los que requieren grandes reparaciones por haberse detectado algún desperfecto o fallo grave, los intermedios que tienen un adecuado estado de conservación y los que tienen un estado de conservación bueno y no necesitan ninguna reforma.

**Tabla 2.5.** Modificador en relación al estado de conservación del edificio (Lantada, 2007).

Estado de conservación	Código	Código USERISK	Modificador $M_{ec}$
<b>Requieren grandes reparaciones</b>	1	D ó O	+0,04
<b>Intermedios</b>	2	R	0
<b>No necesitan reformas</b>	3	N	-0,04

- **Modificador relacionado con las irregularidades en planta,  $M_{ip}$**

Se ha comprobado que los edificios con una geometría regular en planta tienen mejor comportamiento frente a un sismo que los edificios con geometría irregular. Estas irregularidades pueden provocar problemas de rigidez y torsión.

Para definir el modificador relacionado con las irregularidades en planta (Tabla 2.6), es necesario determinar el valor de un índice denominado Razón de Compacidad (RC). Este valor se puede obtener empleando la expresión 2.3. Donde, el término  $A$  es el área del polígono estudiado y el  $A_c$  el área del círculo que tiene el mismo perímetro.

$$RC = \sqrt{\frac{A}{A_c}} \quad (2.3)$$

Cuando el polígono de estudio es un círculo, el índice RC vale 1. Sin embargo, cuando el polígono tiene cualquier otra forma, su valor varía entre 1 y 0, siendo su valor más próximo a 0 cuanto más diferente sea de un círculo.



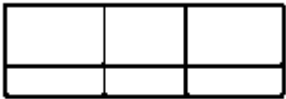

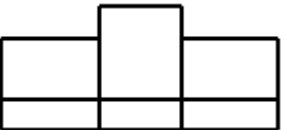
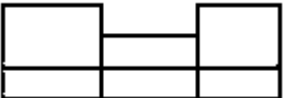
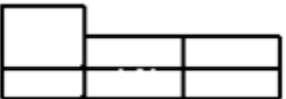
**Tabla 2.6.** Modificador en relación a las irregularidades en planta (Lantada, 2007).

Parámetro RC	Modificador $M_{ip}$
$RC < 0.5$	+0,04
$0.5 \geq RC < 0.7$	+0,02

- **Modificador relacionado con las diferencias en altura con los edificios adyacentes,  $M_{hf}$**

La diferencia en altura con los edificios adyacentes también afecta al comportamiento sísmico del edificio. Esta diferencia sólo se considera en el caso de que sea igual o mayor a dos niveles. En la Tabla 2.7 se muestran varios esquemas representativos de edificios y los valores de este modificador correspondientes a cada uno de ellos.

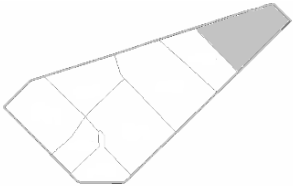
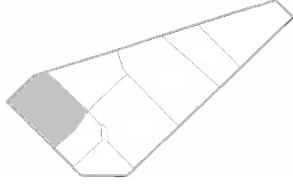
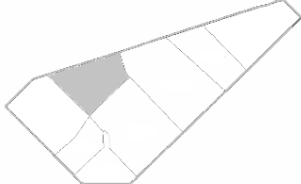
**Tabla 2.7.** Modificador relacionado con la diferencia en altura con los edificios adyacentes (Lantada, 2007).

Esquema	Modificador $M_{hf}$	Código USERISK
	0,00	0
	+0,02	1
	+0,04	2
	-0,04	3
	-0,02	4

- **Modificador relacionado con la posición que ocupa el edificio dentro de la manzana,  $M_{pf}$**

Por último, se aplica un modificador relacionado con la posición que ocupa el edificio dentro de la manzana (Tabla 2.8). Se ha comprobado que los edificios terminales y en esquina sufren mayor daño frente a un sismo que los edificios intermedios, al estar protegidos por los edificios adyacentes. Se considera edificio en esquina aquél que su fachada forma parte de un cruce de calles o chaflán y edificio terminal aquél que se encuentra en contacto con el resto de la manzana tan sólo por uno de sus lados. El resto de edificios se consideran edificios intermedios.

**Tabla 2.8.** Modificador en relación a la posición que ocupa el edificio dentro de la manzana (Lantada, 2007).

Esquema	Posición	Código USERISK	Modificador $M_{pf}$
	Terminal	3	+0,06
	Esquina	1	+0,04
	Intermedio	2	-0,04

**Otros modificadores:**

- **Modificador relacionado con las irregularidades en altura,  $M_{ih}$**

Muchos edificios están subdivididos en subparcelas con diferente número de plantas. Es importante considerar el modificador relacionado con las irregularidades en altura, pues al existir estas irregularidades en elevación, se introducen cambios en la rigidez y la masa de la estructura. Se calcula con la expresión 2.4.

$$M_{ih} = +0,02 \quad \text{si } 1 < \delta \leq 3 \quad (2.4)$$

$$M_{ih} = +0,04 \quad \text{si } \delta > 3$$

Donde:

$$\delta = h_{max} - h_V = h_{max} - \frac{\sum_{k=1}^n (A_k \cdot h_k)}{\sum_{k=1}^n A_k}$$

Siendo  $h_V$  la altura que tendría un edificio regular en altura con el mismo volumen total y la misma superficie en planta que el edificio estudiado,  $h_{max}$  el número máximo de plantas del edificio,  $n$  el número de subparcelas del edificio con distinto número de plantas,  $A_k$  el área correspondiente a la subparcela  $k$  y  $h_k$  el número de plantas de la subparcela  $k$ .

- **Modificador relacionado con la longitud de la fachada  $M_f$**

Debido a las particulares características constructivas de los edificios localizados en el distrito del *Eixample*, se debería aplicar un modificador relacionado con la longitud de la fachada en aquellos edificios que lo requieran.

La principal característica de estos edificios es que los muros de la fachada y los muros de carga interiores no están conectados. Además, los muros son de un grosor insuficiente. Se debe penalizar (expresión 2.5) a aquellos edificios cuya fachada libre tenga una longitud mayor a 15 metros (Lantada, 2007).

$$M_f = \frac{0,04}{15} \cdot Long_{fachada} - 0,04 \quad (2.5)$$

- **Modificador por piso blando,  $M_{pb}$**

Se conoce como piso blando a aquella planta de una estructura cuya rigidez lateral es inferior a la de las plantas superiores. La diferencia de rigidez, ocasiona que los edificios con esta característica tengan un mal comportamiento sísmico.

En gran parte de los edificios situados en el distrito del *Eixample*, la planta baja tiene un uso comercial, caracterizada por tener pocos muros. Mientras que los pisos superiores, generalmente destinados a vivienda, contienen muchos tabiques de albañilería que los rigidizan lateralmente. De tal forma que, la planta baja es la parte más débil del edificio.

Por este motivo, se debería aplicar un modificador que penalizara a este tipo de edificios. En la metodología LM1 propuesta por el proyecto Risk-UE se le da un valor de 0,04 a este modificador del índice de vulnerabilidad (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

### 2.2.2. Funciones de vulnerabilidad

Para representar la vulnerabilidad de los edificios de manera probabilista, mediante las funciones de vulnerabilidad, se toman los mismos criterios que Aguilar (2011), al emplear el programa USERISK 2011. Estas funciones siguen una distribución de probabilidad Beta (expresión 2.6), cuyo valor medio  $\mu$  se estima con la expresión 2.7 y su desviación estándar con la expresión 2.8.

$$f\left(\frac{V - V_a}{V_b - V_a}; \alpha, \beta\right) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{V - V_a}{V_b - V_a}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{V - V_a}{V_b - V_a}\right)^{\beta-1} \quad (2.6)$$

$$V_a \leq V \leq V_b ; \alpha, \beta > 0$$

$$\mu = \frac{V_b - V_a}{\alpha + \beta} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (2.7)$$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} \cdot (V_b - V_a)^2} \quad (2.8)$$

Los términos  $V_a$  y  $V_b$  representan al valor inicial y final del índice de vulnerabilidad en la función. Por defecto, el programa USERISK 2001 establece los valores -1 y 2 para estos límites del rango. Sin embargo, permite modificar estos valores.

Por lo tanto, para obtener las curvas de vulnerabilidad sísmica sólo es necesario conocer los valores  $\alpha$  y  $\beta$  de las funciones. Se deben seguir los siguientes pasos para determinar los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  en la curva *Best* (Aguilar, 2011), la cual representa la mejor estimación de la vulnerabilidad:

- 1) Obtención del índice de vulnerabilidad más probable del edificio,  $V_I$ . En el apartado anterior se explica el procedimiento a seguir para la obtención del mismo.
- 2) Determinación de los valores  $V_c$  y  $V_d$ . Se calculan aplicando a los valores límites del índice de vulnerabilidad básico,  $V_I^{min}$  y  $V_I^{max}$  (Tabla 5.2), los modificadores regionales  $\Delta M_R$  y del comportamiento  $\Delta M_C$  correspondientes al edificio (expresiones 2.9 y 2.10).

$$V_c = V_I^{min} + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (2.9)$$

$$V_d = V_I^{max} + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (2.10)$$

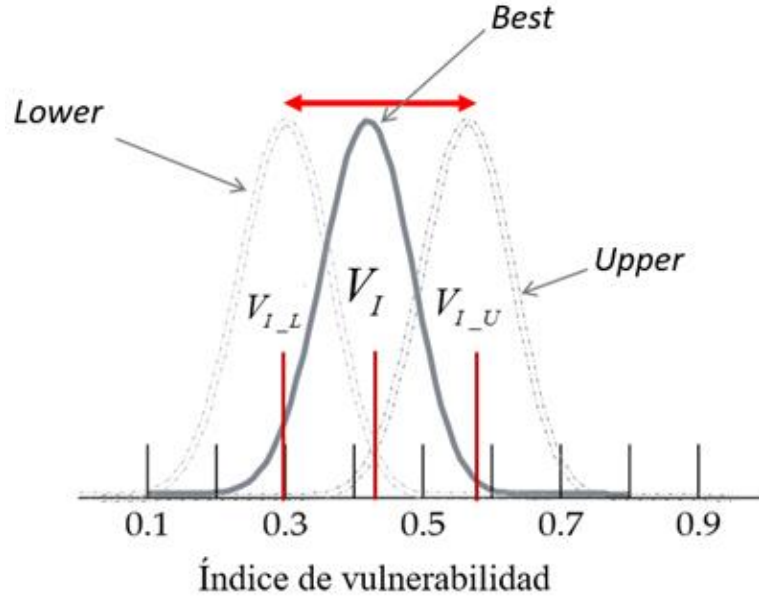
Estos valores del índice de vulnerabilidad delimitan el intervalo de confianza del 90% (expresión 2.11).

$$0,9 = \int_{y_1}^{y_2} f(y) dy = B_{y_2}(\alpha, \beta) - B_{y_1}(\alpha, \beta) \quad (2.11)$$

Donde,  $B_{y_2}$  y  $B_{y_1}$  son las funciones Beta incompletas en  $y_2$  e  $y_1$ . Mientras que  $y_1$  es igual a  $V_c$ , e  $y_2$  igual a  $V_d$ .

- 3) Estimación de los valores  $\alpha$  y  $\beta$ . Estos valores se estiman a partir de los valores de  $V_I$ ,  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  y  $V_d$  y de las ecuaciones que definen a la función Beta, seleccionando los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  que mejor ajustan a los tres puntos  $V_I$ ,  $V_c$  y  $V_d$ .

Asimismo, en esta metodología se consideran las incertidumbres asociadas a la determinación de la tipología estructural del edificio, mediante las curvas *Lower* y *Upper* (Figura 2.2). Para estimar estas curvas de vulnerabilidad inferior y superior se sigue el mismo procedimiento, sin embargo, el valor de los índices de vulnerabilidad  $V_{I_L}$  y  $V_{I_U}$  se obtienen, respectivamente, con las expresiones 2.12 y 2.13.



**Figura 2.2.** Curvas de vulnerabilidad de un edificio obtenidas con la metodología LM1\_P (Aguilar, 2011).

$$V_{I-L} = V_I - \frac{10-f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_V \quad (2.12)$$

$$V_{I-U} = V_I + \frac{10-f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_V \quad (2.13)$$

Siendo  $f$  el factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural. Este valor varía entre 0 y 10, considerándose al factor de fiabilidad 0 como fiabilidad nula y al 10 como fiabilidad completa. En el cuarto capítulo de esta memoria se hace una prueba de lo que sucede al variar el valor de este parámetro.

Los valores de  $V_c$  y  $V_d$  en las curvas de vulnerabilidad inferior y superior también varían y se calculan con las expresiones 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17, respectivamente.

$$V_{c-L} = \left( V_I^{min} - \frac{10-f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_V \right) + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (2.14)$$

$$V_{d-L} = \left( V_I^{max} - \frac{10-f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_V \right) + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (2.15)$$

$$V_{c-U} = \left( V_I^{min} + \frac{10-f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_V \right) + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (2.16)$$

$$V_{d_U} = \left( V_I^{max} + \frac{10-f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_V \right) + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (2.17)$$

### 2.3. Daño en los edificios

Se puede obtener el grado de daño más probable o grado de daño medio ( $\mu_D$ ) conociendo previamente el grado de intensidad que afecta al edificio ( $I$ ) y su índice de vulnerabilidad ( $V_I$ ). Se calcula con la expresión 2.18, propuesta en la metodología de nivel I del proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

$$\mu_D = 2,5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6,25 \cdot V_I - 13,1}{2,3} \right) \right] \quad (2.18)$$

#### 2.3.1. Matrices de probabilidad de daño

Las matrices de probabilidad de daño (PDM, *Probability Damage Matrices*) se componen de las probabilidades de que el edificio sufra el nivel de daño considerado (Tabla 2.9) al intervenir distintos niveles de la acción sísmica, es decir, en este caso, distintos grados de intensidad macrosísmica en la escala EMS-98.

**Tabla 2.9.** Estados de daño de las estructuras en el Método del Índice de Vulnerabilidad.

Estado de daño	
<b>0</b>	Sin daño
<b>1</b>	Leve
<b>2</b>	Moderado
<b>3</b>	Severo
<b>4</b>	Muy Severo
<b>5</b>	Completo

Las PDM se pueden calcular mediante una distribución Binomial (expresión 2.19) o una distribución Beta equivalente (expresión 2.20). Ambas expresiones sólo dependen del grado de daño medio o grado de daño más probable  $\mu_D$ .

$$P_k(N, \mu_D) = \frac{(N-1)!}{(N-1-k)!k!} \mu_D^k (1-\mu_D)^{N-1-k} \quad (2.19)$$

Donde:

- $P_k(N, \mu_D)$  Probabilidad de daño del estado de daño  $k$ .  
 $N$  Número de estados de daño.  
 $\mu_D$  Grado de daño medio o grado de daño más probable  
 $k$  Estado de daño. Está comprendido entre 0 y  $N-1$ .

$$P_\beta(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-1}(b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad a \leq x < b \quad (2.20)$$

Donde:

- $P_\beta(x)$  Probabilidad de que el daño sea igual o menor al grado de daño  $x$ .  
 $x$  Grado de daño  
 $t$  Dispersión de la distribución ( $t=8$ )  
 $\Gamma$  Función gamma  
 $a$  y  $b$  Valores extremos de la función de densidad de probabilidad ( $a = 0$  y  $b = 6$ )  
 $r$  Parámetro de la distribución calculado con la expresión 5.21

El parámetro  $r$  de la distribución Beta se ajusta de tal forma que esta distribución sea equivalente a la distribución Binomial de parámetro  $\mu_D$  (expresión 2.21).

$$r = t(0,007\mu_d^3 - 0,052\mu_d^2 + 0,2875\mu_d) \quad (2.21)$$

Con la distribución Binomial se obtienen directamente las probabilidades de que el edificio sufra cada uno de los niveles de daño considerados. Sin embargo, con la función de distribución Beta (CDF, *Cumulative Distribute Function*) se obtienen las probabilidades acumuladas, es decir, se calcula el área de la función de densidad comprendida entre los valores  $a$  y  $x$  (expresión 2.22), donde  $a$  es el punto inicial de la función. Por ello, para obtener las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño  $k$  se emplea la expresión 2.23.

$$P_\beta(x) = \int_a^x p_\beta(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.22)$$



$$p_k = P_\beta(k + 1) - P_\beta(k) \quad (2.23)$$

### 2.3.2. Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad representan las probabilidades de excedencia en función de la intensidad sísmica ( $\mu_D$ ) y el grado de daño ( $k$ ). El valor de la curva de fragilidad para un cierto grado de daño  $k$ , se calcula como la unidad menos la probabilidad de que se presente el mismo o menor grado de daño (expresión 2.24).

$$P(D \geq D_k) = 1 - P_\beta(k) \quad (2.24)$$

## 2.4. Riesgo de daño físico

El programa USERISK 2011 permite hacer estimaciones del riesgo de daño físico en edificios localizados en zonas urbanas. Pues se obtienen, para cada edificio, curvas que representan la frecuencia anual de excedencia de los estados de daño. Para determinarlas, es necesario conocer la curva de peligrosidad sísmica de la zona de estudio, las curvas de vulnerabilidad que representan al edificio y sus correspondientes matrices de probabilidad de daño. La frecuencia anual de excedencia de cada estado de daño se calcula con la expresión 2.25.

$$v[D] = \sum_I \sum_V P[D > D_k | V, I] P[V] \gamma'[I] \quad (2.25)$$

Donde:

$P[D \geq D_k | V, I]$  Probabilidad de que se exceda el grado de daño  $D_k$  ( $k=0, 1, 2, 3, 4, 5$ ).

$P[V]$  Probabilidad de que la vulnerabilidad sísmica del edificio sea igual a  $V$ .

$\gamma'[I]$  Frecuencia anual de ocurrencia de la intensidad macrosísmica  $I$ .

Las curvas de peligrosidad sísmica representan la frecuencia anual de excedencia de cada grado de intensidad macrosísmica. Por lo que, para obtener las frecuencias anuales de ocurrencia de cada grado de intensidad ( $\gamma'[I]$ ), simplemente, se debe restar a la frecuencia de excedencia del grado de intensidad  $I_i$ , la frecuencia de excedencia de un grado de intensidad menor,  $I_{i-1}$ . Por otro lado, la probabilidad de que la vulnerabilidad

sísmica del edificio sea igual a  $V$  se obtiene discretizando las curvas de vulnerabilidad del edificio para el intervalo de cálculo deseado. Por último, la probabilidad de excedencia del grado de daño  $D_k$  se calcula a través de las matrices de probabilidad de daño, considerando que éstas representan las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño.

## 2.5. Costes económicos

La estimación de los costes económicos derivados de la interacción de un sismo de una determinada intensidad con los edificios de la zona urbana de estudio es bastante complicada. Sin embargo, es muy importante evaluar este parámetro, ya que existe un amplio consenso en que la dimensión de una catástrofe está directamente relacionada con su coste económico (Lantada, 2007). Para realizar esta estimación, se deben conocer las matrices de probabilidad de daño que contienen las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño al someter a las estructuras a un sismo de dicha intensidad.

Las pérdidas directas ocasionadas por un terremoto en los edificios residenciales se calculan como la suma de los costes de rehabilitación y los costes ocasionados por el deterioro del contenido de los mismos.

Como es lógico, el coste de rehabilitación es proporcional al daño físico sufrido en el edificio. Para calcularlo se supone que el coste del  $m^2$  de área dañada de los edificios con la misma tipología estructural es el mismo. El coste de rehabilitación se obtiene con la expresión 2.26.

$$Coste = \sum_{t=1}^{N_t} \left\{ V_{C_t} \sum_{j=1}^{N_{et}} \left[ Area_{jt} \sum_{k=1}^{N_s} P_{jtk} \cdot RC_{tk} \right] \right\} \quad (2.26)$$

Donde:

- $t$       Tipos de edificio
- $N_t$     Número de tipos de edificio considerados
- $V_{C_t}$    Coste estimado del  $m^2$  para los edificios del tipo  $t$
- $j$       Edificio

$N_{et}$	Número de edificios del tipo $t$
$Area_{jt}$	Área del edificio $j$ del tipo $t$
$k$	Estado de daño
$N_s$	Número de estados de daño diferentes del estado de daño nulo
$P_{jtk}$	Probabilidad del estado de daño $k$ en el edificio $j$ del tipo $t$
$RC_{tk}$	Coste del daño causado por el estado de daño $k$ en los edificios del tipo $t$

Sin embargo, para simplificar esta ecuación, se considera que el coste del  $m^2$  ( $V_{C_t}$ ) para todas las tipologías es el mismo, al considerar que los materiales, técnicas y mano de obra utilizados ocasionan costes muy similares (Lantada, 2007). Al dividir el coste de rehabilitación entre el coste del  $m^2$  ( $V_C$ ), se obtiene el coste relativo o superficie equivalente destruida (expresión 2.27).

$$R_{coste} = \frac{Coste}{V_C} = \sum_{t=1}^{N_t} \left\{ \sum_{j=1}^{N_{et}} \left[ Area_{jt} \sum_{k=1}^{N_s} P_{jtk} \cdot RC_{tk} \right] \right\} \quad (2.27)$$

Como valor de  $V_C$  se ha tomado el precio del  $m^2$  correspondiente a una vivienda residencial plurifamiliar de clase media y de hormigón armado. Este valor es de 950,47 €/m<sup>2</sup> y se ha tomado del Boletín Económico de la Construcción (2015).

El coste del daño causado por cada estado de daño se muestra en la tabla 2.10 (Roca, 2004). Sólo se consideran cinco estados de daño para calcular el coste de rehabilitación de los edificios. Esto se debe a que cuando el daño en la estructura es mayor al 60%, se considera que el coste de rehabilitación es superior al de reposición. Por eso los estados de daño cuatro y cinco (*muy severo* y *completo*) se han agrupado en un único estado de daño, el daño *completo*.

**Tabla 2.10.** Coste del daño causado por cada estado de daño  $RC_{tk}$ .

	Estado de daño	$RC_{tk}$
<b>0</b>	Nulo	0%
<b>1</b>	Leve	2%
<b>2</b>	Moderado	10%
<b>3</b>	Severo	50%
<b>4</b>	Completo	100%

Por último, además de los costes económicos debidos al deterioro de la estructura se deben considerar los costes económicos debidos al deterioro del contenido de los edificios. Se estima que los costes económicos ocasionados por la pérdida de los bienes materiales situados en el interior de los edificios residenciales ascienden a un 50 % del valor de reposición del edificio, según el informe del ATC-13 (McCormack y Rad, 1997).

## **2.6. Pérdidas humanas**

La estimación del número de víctimas ocasionadas por la ocurrencia de un sismo es un proceso complejo e impreciso. El número de fallecidos y heridos varía en función del daño físico sufrido en los edificios donde reside la población de la zona urbana de estudio. Para realizar esta estimación es necesario conocer las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño y la densidad y distribución de la población en el instante en que sucede el terremoto.

Dado un tipo de edificio y una categoría de personas dañadas, el correspondiente número de víctimas se calcula con la expresión 2.28 (Coburn y Spence, 1992).

$$K_S = C \cdot [M1 \cdot M2 \cdot M3 \cdot (M4 + M5 \cdot (1 - M4))] \quad (2.28)$$

Donde  $C$  es el número de edificios colapsados y se calcula multiplicando el número de edificios de cada clase por la probabilidad de colapso obtenida.  $M1$  es el número de personas que residen en cada edificio,  $M2$  es el porcentaje de ocupación,  $M3$  es el porcentaje de ocupantes del edificio que quedan atrapados por su colapso,  $M4$  es el porcentaje de las personas atrapadas que sufrirán este tipo de daño y, por último,  $M5$  representa la mortalidad post-terremoto.

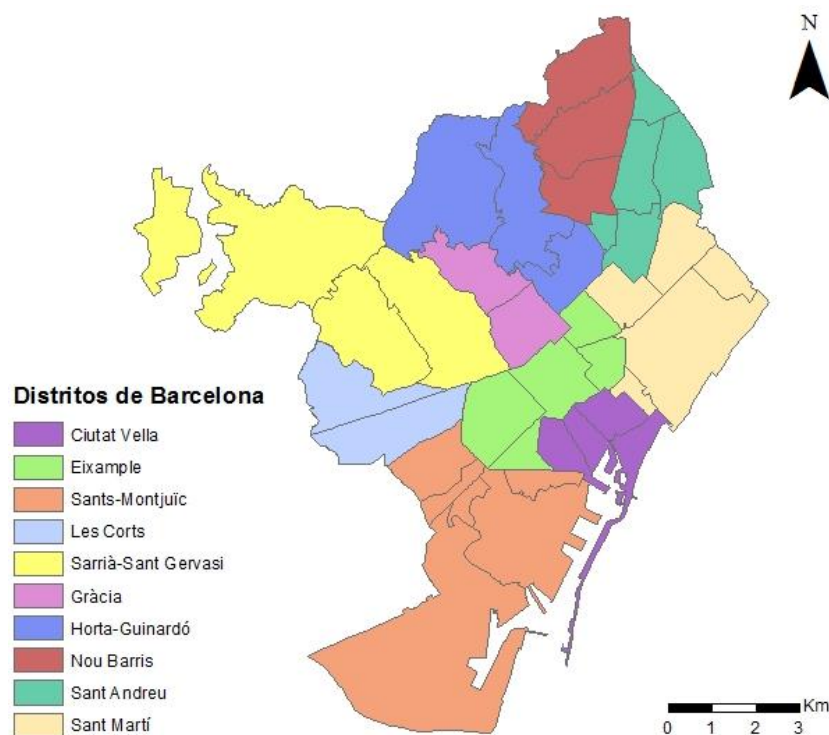
El acierto en esta estimación del número de víctimas aumenta con la precisión en la determinación de los parámetros que intervienen en el cálculo. Los valores seleccionados para todos los parámetros se explican en el capítulo de resultados.

### 3. APLICACIÓN AL DISTRITO DEL *EIXAMPLE*

La zona urbana de estudio en la que se centra este trabajo es el distrito del *Eixample*, perteneciente a la ciudad de Barcelona. Barcelona es la capital de la Comunidad Autónoma de Cataluña, situada en el NE de España.

#### 3.1. Organización territorial de Barcelona

La ciudad de Barcelona se divide en 10 distritos municipales (Figura 3.1). A su vez éstos se dividen en barrios. Hasta hace unos años, la ciudad de Barcelona se dividía en 38 barrios (Tabla 3.1), aunque actualmente este número asciende hasta 73. Debido a que la base de datos empleada es anterior a la última división, se tendrá en cuenta que Barcelona está dividida en 38 barrios.



**Figura 3.1.** Mapa de Barcelona que muestra la división del territorio en distritos.

A su vez, los barrios se dividen en unidades más pequeñas, denominadas “Zones de Recerca Petites” (ZRP). Estas zonas fueron definidas por el Departamento de Estadística del Ayuntamiento de Barcelona con la finalidad de realizar un estudio

estadístico de la ciudad (Lantada, 2007). En total, la ciudad de Barcelona se divide en 248 “Zones de Recerca Petites” (ZRP).

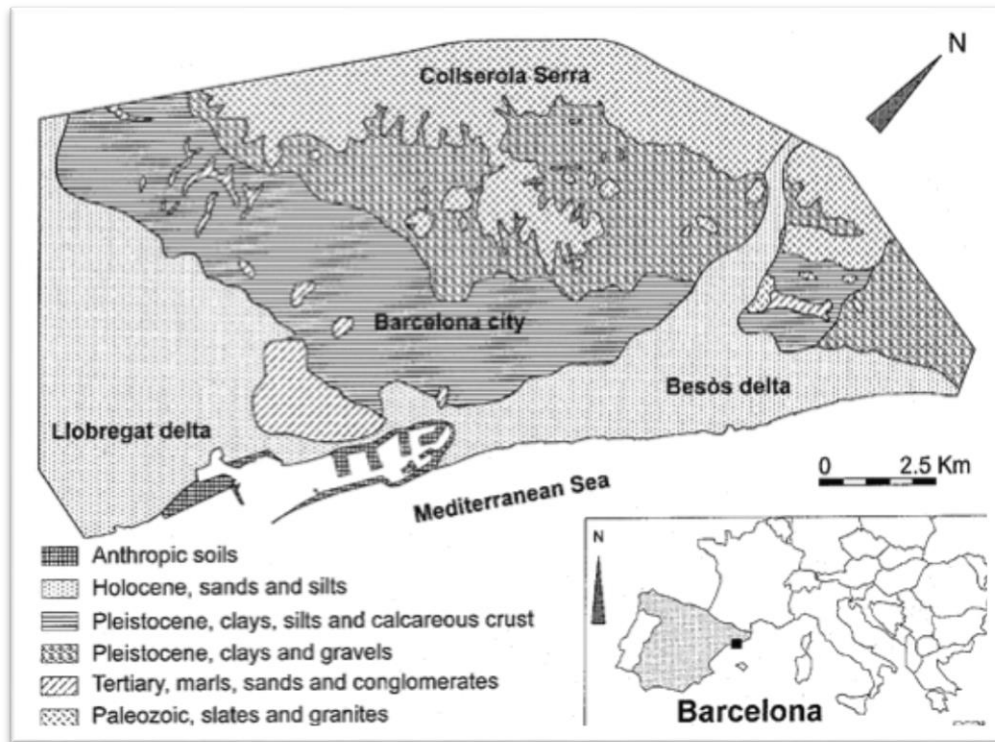
**Tabla 3.1.** Organización territorial de Barcelona en distritos y barrios.

CÓDIGO DEL DISTRITO	DISTRITO	CÓDIGO DEL BARRIO	BARRIOS
01	Ciutat Vella	0101	Barceloneta
		0102	Gòtic
		0103	Parc
		0104	Raval
02	Eixample	0201	Dreta Eixample
		0202	Esquerra Eixample
		0203	Estació Nord
		0204	Sagrada Família
		0205	Sant Antoni
03	Sants-Montjuïc	0301	Bordeta-Hostafrancs
		0302	Font de la Guatla
		0303	Montjuïc
		0304	Poble Sec
		0305	Sants
		0306	Zona Franca-Port
04	Les Corts	0401	Les Corts
		0402	Pedralbes
05	Sarrià-Sant Gervasi	0501	Sant Gervasi
		0502	Sarrià
		0503	Vallvidrera-Les Planes
06	Gràcia	0601	Gràcia
		0602	Vallcarca
07	Horta-Guinardó	0701	Guinardó
		0702	Horta
		0703	Vall d'Hebron
08	Nou Barris	0801	Ciutat Meridiana-Vallbona
		0802	Roquetes-Verdum
		0803	Viliapicina-Turó de la Peira
09	Sant Andreu	0901	Bon Pastor
		0902	Congrés
		0903	Sagrera
		0904	Sant Andreu
		0905	Trinitat Vella
10	Sant Martí	1001	Barris Besòs
		1002	Clot
		1003	Fort Pius
		1004	Poblenou
		1005	Verneda

### 3.2. Geología de la ciudad de Barcelona

Barcelona se extiende a lo largo de la costa del mar Mediterráneo. Está limitada al N-NW por la sierra de Collserola, al SW por el delta del río Llobregat y al NE por el delta del río Besòs.

En la Figura 3.2 se puede observar cómo la sierra de Collserola está formada por materiales del Paleozoico, en su mayoría por pizarras y granitos. El llano central, donde se sitúa la ciudad, por materiales del Pleistoceno, como arcillas, limos y costras calcáreas. Y los deltas de los ríos Llobregat y Besòs por materiales del Holoceno, como arenas y limos.



**Figura 3.2.** Mapa geológico de la ciudad de Barcelona (Cid et al.,2001).

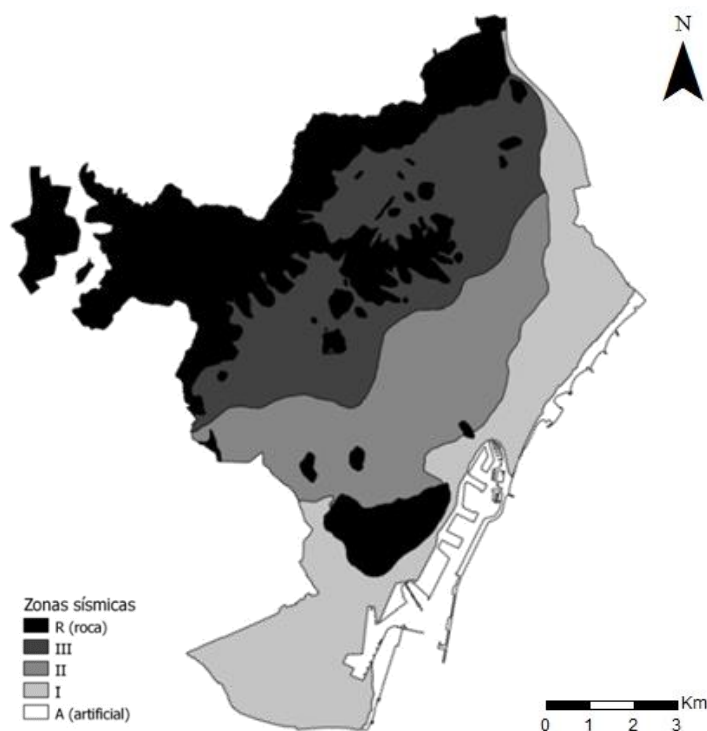
El tipo de suelo sobre el que se sitúa la ciudad de Barcelona puede producir la amplificación de los efectos sísmicos (Cid et al., 2001), ya que se sitúa sobre un suelo de tipo blando, formado por depósitos del Cuaternario.

### 3.3. Sismicidad de Barcelona

La probabilidad de que ocurra un sismo destructivo en Barcelona es considerablemente baja. En la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02), está clasificada con una aceleración básica ( $a$ ) de 0,04 g. Si se transforma a intensidad ( $I$ ) EMS-98 (NCSE-02, 2009), equivale a un grado de intensidad VI (expresión 3.1). Sin embargo, ciertos estudios evalúan esta intensidad como VI-VII (Cid et al., 2001).

$$\log_{10} a = 0,30103 \cdot I - 0,2321 \quad (3.1)$$

Se sabe que la respuesta sísmica es distinta en función del tipo de suelo, amplificándose en los terrenos más blandos. Debido a la distinta geología sobre la que se asienta Barcelona, se deben tener en cuenta los efectos de sitio. Para ello, se divide la ciudad en cuatro zonas sísmicas (Figura 3.3), con las características que se muestran en la Tabla 3.2 (Cid et al., 2001).



**Figura 3.3.** Mapa de la ciudad de Barcelona que muestra las distintas zonas sísmicas (Cid et al., 1999).



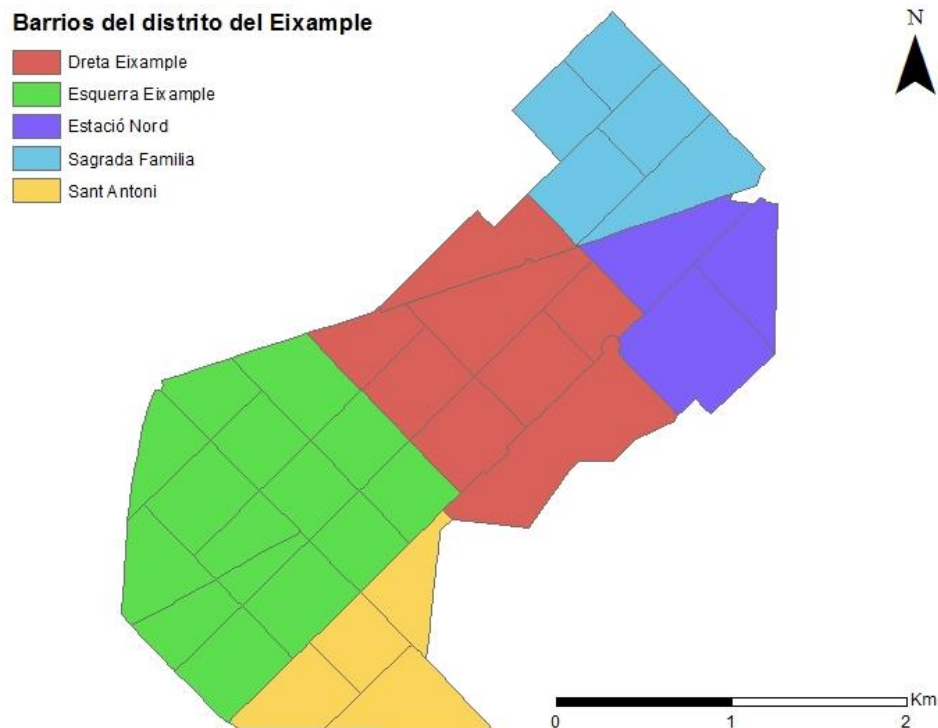
**Tabla 3.2.** Zonas sísmicas en las que se divide la ciudad de Barcelona.

ZONA SÍSMICA	DESCRIPCIÓN
<b>R</b>	Afloramientos rocosos
<b>I</b>	Afloramientos holocenos
<b>II</b>	Afloramientos pleistocenos con sustrato terciario, de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta.
<b>III</b>	Afloramientos pleistocenos sin sustrato terciario, de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta.
<b>A</b>	Terreno artificial

### 3.4. Distrito del *Eixample*

#### 3.4.1. Divisiones administrativas

El distrito del *Eixample* se divide en 5 barrios (Figura 3.4) y en 35 “Zones de Recerca Petites” (Tabla 3.3).



**Figura 3.4.** Mapa del distrito del Eixample que muestra la división en ZRP de cada uno de los barrios pertenecientes al distrito.

**Tabla 3.3.** División del distrito del Eixample en barrios y ZRP.

CÓDIGO DEL DISTRITO	DISTRITO	CÓDIGO DEL BARRIO	BARRIO	CÓDIGO DE LA ZRP	ZRP
<b>02</b>	<b><i>Eixample</i></b>	0205	<i>Sant Antoni</i>	0205038	Mercat San Antoni
				0205039	Av. Mistral
				0205040	C/ Sepúlveda - Viladomat
				0205041	C/ Sepúlveda - Casanova
				0202042	Universitat
				0202043	C/ Casanova - Diputació
				0202044	Casa Golferichs
				0202045	PArc Escorxador
		0202	<i>Esquerra Eixample</i>	0202046	C/ Llança
				0202047	Av. Roma - Aragó
				0202048	Telefónica
				0202049	Mercat Ninot
				0202050	C/ Aribau - Mallorca
				0202051	C/ Aribau - Còrsega
				0202052	Hospital Clínic
				0202053	Escola Industrial
				0202054	Presó Model
				0202055	C/ Londres - Borrell
				0202056	C/ Londres - Casanova
		0201	<i>Dreta Eixample</i>	0201057	La Pedrera
				0201058	Casa de les Punxes
				0201059	Mercat Concepció
				0201060	Pg. Gràcia Central
				0201061	Illa Discòrdia
				0201062	Torre de les Aigües
				0201063	Tetuan Nord
				0201064	Pl. Catalunya - Rondes
		0203	<i>Estació Nord</i>	0203065	Estació del Nord
				0203066	Auditori
				0203067	Plaça Monumental
		0204	<i>Sagrada Família</i>	0204068	Pl. Hispanitat
				0204069	Mercat Sagrada Família
				0204070	Sagrada Família
				0204071	Jardins Industria
				0204072	Creu Roja

### 3.4.2. Población

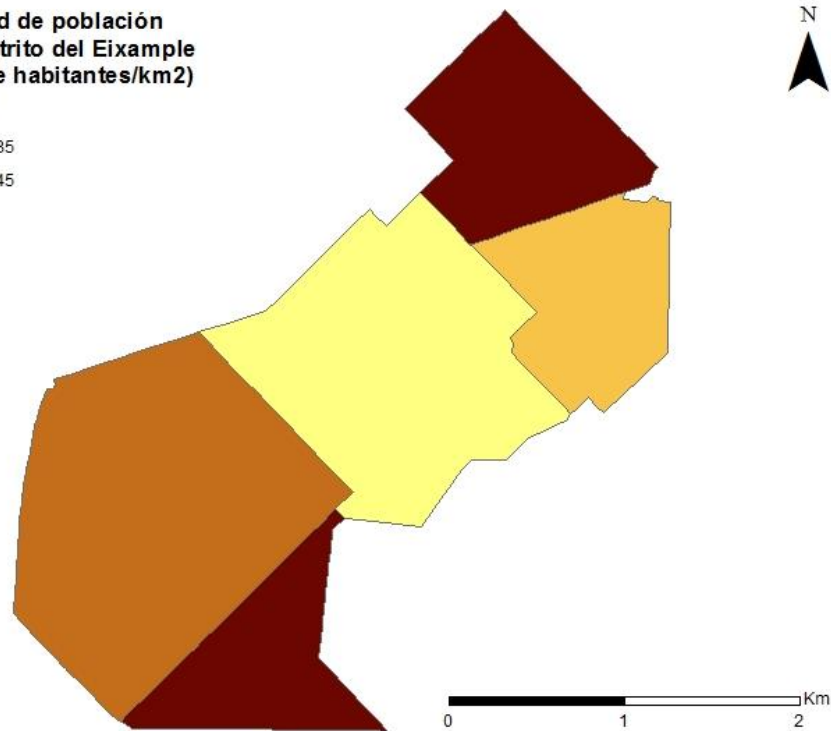
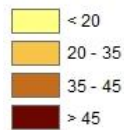
El *Eixample* es el distrito con mayor densidad de población de Barcelona, con 34863 hab/km<sup>2</sup> (Tabla 3.4) según el censo del Instituto Nacional de Estadística del 1 de enero de 2004. Los barrios con mayor densidad de población son el barrio de *Sagrada Família*

con 49802 hab/km<sup>2</sup> y el barrio de *Sant Antoni* con 47210 hab/km<sup>2</sup>. El barrio de *Dreta Eixample* es el que menor densidad de población tiene con 19748 hab/km<sup>2</sup> (Figura 3.5).

**Tabla 3.4.** Densidad de población en Barcelona.

DISTRITO	DENSIDAD DE POBLACIÓN (habitantes/km <sup>2</sup> )
<i>Ciutat Vella</i>	23943
<i>Eixample</i>	34863
<i>Sants-Montjuïc</i>	8246
<i>Les Corts</i>	13718
<i>Sarrià-Sant Gervasi</i>	6900
<i>Gràcia</i>	28477
<i>Horta-Guinardó</i>	14197
<i>Nou Barris</i>	20572
<i>Sant Andreu</i>	21504
<i>Sant Martí</i>	20192

Densidad de población en el distrito del Eixample (miles de habitantes/km<sup>2</sup>)



**Figura 3.5.** Mapa del distrito del Eixample que muestra la densidad de población en cada uno de sus barrios.

### **3.4.3. Edificios**

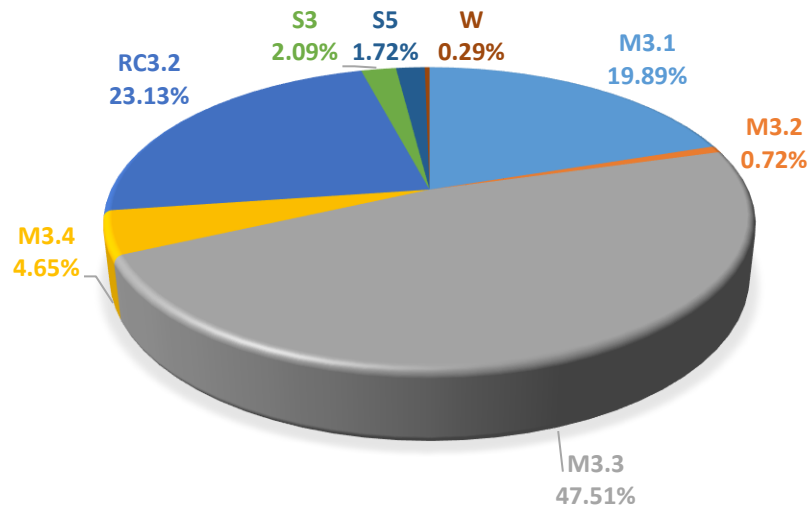
El estudio se centra concretamente en los edificios de uso residencial del distrito del *Eixample*. La información de cada uno de estos edificios se ha integrado en una base de datos y se comenta con detalle en este apartado. Para gestionar esta información se emplea un programa de SIG (Sistema de Información Geográfica). En este caso el programa elegido es ArcGIS.

#### **Información contenida en la base de datos**

La base de datos SIG está formada por un total de 8658 edificios. De los cuales, es necesario conocer la siguiente información:

- Identificador del distrito: está formado por dos dígitos. En la tabla 3.1 se recogen los identificadores correspondientes a cada uno de los distritos. El distrito del *Eixample* tiene el identificador 02.
- Identificador del barrio: está formado por cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos corresponden al distrito al que pertenece el barrio y los otros dos permiten identificar al barrio. En la tabla 3.1 se recogen los identificadores correspondientes a cada uno de los barrios.
- Identificador de la ZRP: está formado por siete dígitos. Los cuatro primeros corresponden al distrito y al barrio y los tres últimos a la ZRP.
- Identificador de la manzana: está formado por cinco dígitos.
- Identificador de la parcela: está formado por seis dígitos. Los cinco primeros corresponden a la manzana y el último a la parcela.
- Identificador del edificio: está formado por nueve dígitos. Los seis primeros corresponden a la parcela y el resto al edificio.
- Área del edificio: en este campo se recoge la superficie en planta que ocupa el edificio, expresada en metros cuadrados.
- Perímetro del edificio: expresado en metros.
- Código de la tipología estructural según Risk-UE: la mayor parte de los edificios localizados en el *Eixample* son de mampostería (con un 73%). En concreto, la tipología estructural más abundante es la M3.3, es decir, mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería, con un 47%. Seguida de

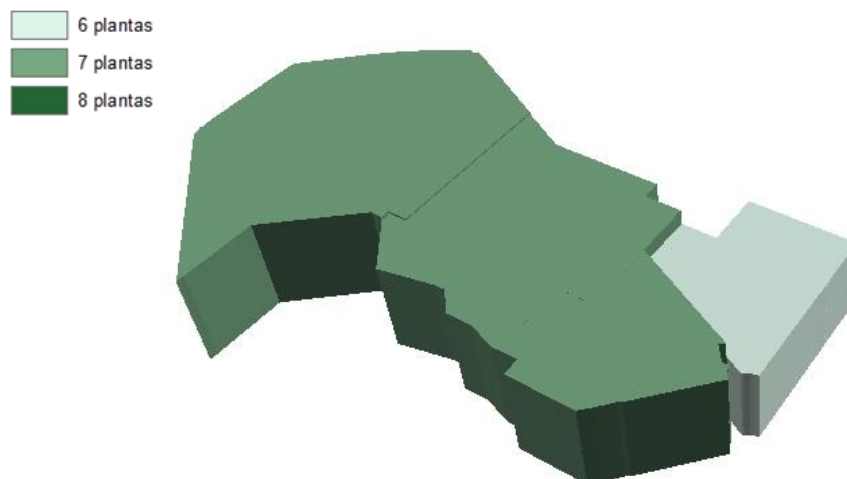
las estructuras de hormigón con muros de relleno de mampostería no reforzada (RC3.2), con un 23%. Mientras que un porcentaje despreciable de edificios están registrados como estructura metálica o de madera (Figura 3.6).



**Figura 3.6.** Tipologías estructurales de los edificios pertenecientes al distrito del Eixample.

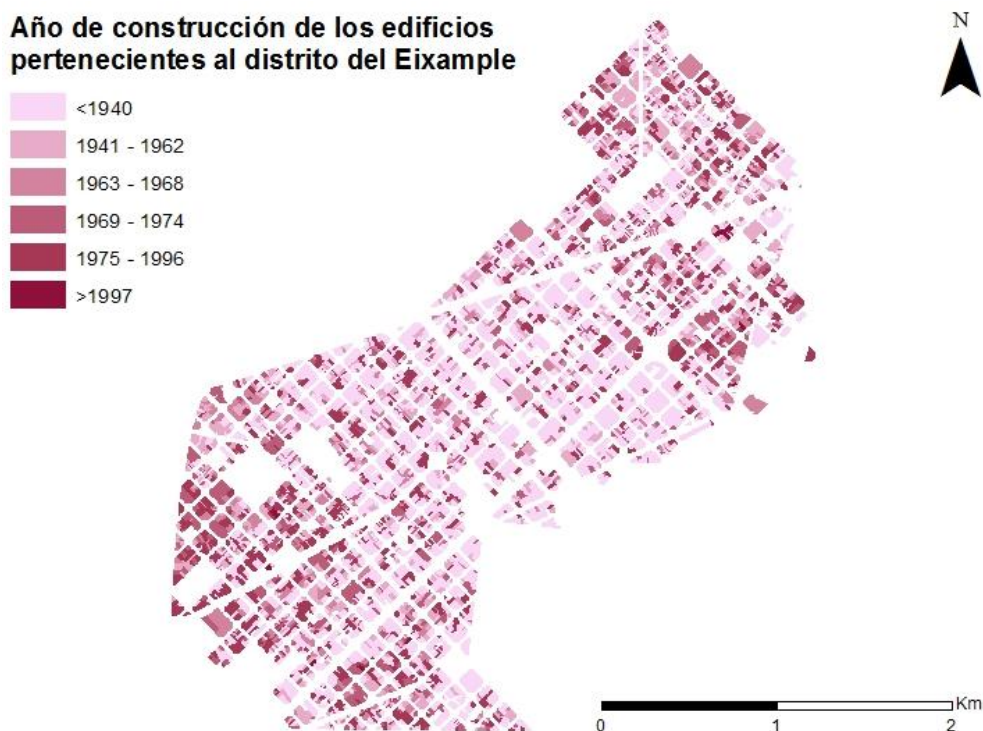
- Número de plantas: los edificios del distrito de estudio se caracterizan por ser bastante altos. En la mayoría de los barrios la altura media es de siete plantas, menos en el barrio de *Sagrada Família*, en el cual la altura media es de seis plantas (Figura 3.7).

**Altura media de los edificios de cada barrio en el distrito del Eixample**



**Figura 3.7.** Altura media de los edificios localizados en cada barrio del distrito del Eixample.

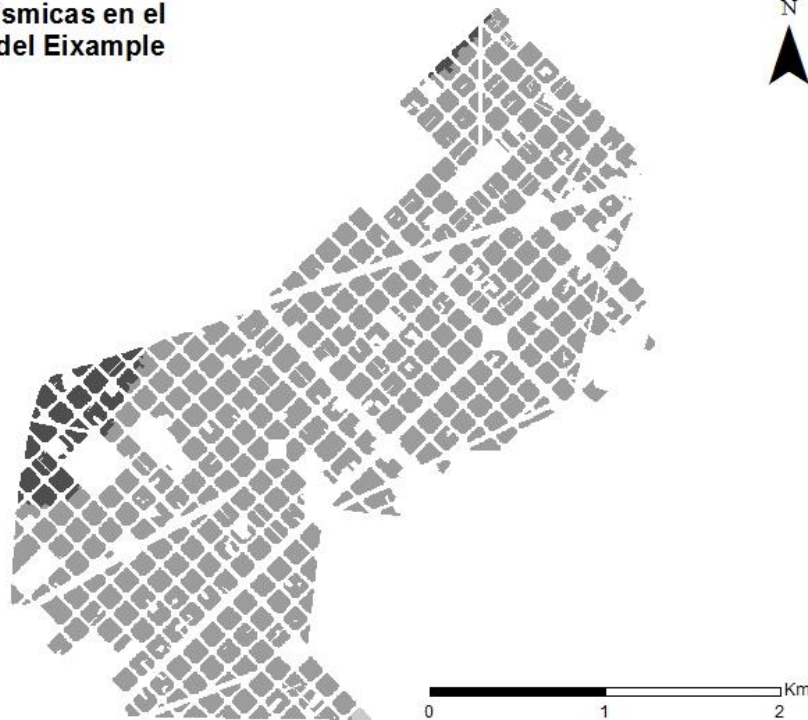
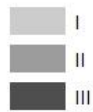
- **Año de construcción:** los edificios localizados en este distrito, en general, son bastante antiguos. Una importante parte de ellos fueron construidos antes del año 1940, es decir, mucho antes de existir ninguna norma de construcción sismorresistente. La primera normativa sísmica surge en el año 1968, y a partir de este momento se empieza a tener en cuenta el diseño sísmico. En la Figura 3.8 se puede observar cómo en la mayor parte de los edificios el año de construcción es anterior a esta fecha.



**Figura 3.8.** Año de construcción de los edificios localizados en el distrito del Eixample.

- **Zona sísmica:** como se ha comentado anteriormente, la ciudad de Barcelona se divide en distintas zonas sísmicas. La mayor parte de los edificios localizados en el distrito del Eixample se sitúan sobre la zona sísmica II, sin embargo, una pequeña parte se sitúa en las zonas sísmicas I y III (Figura 3.9).

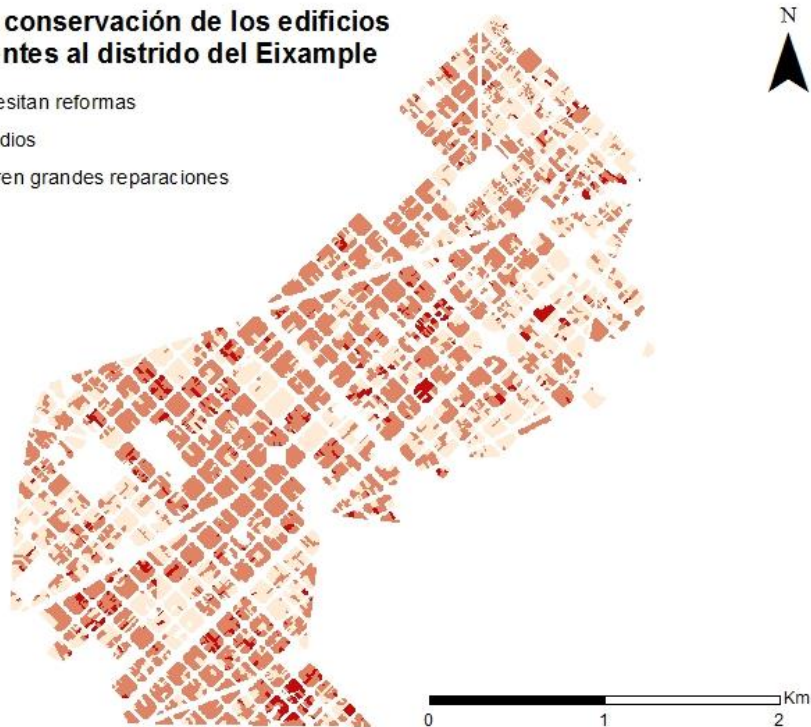
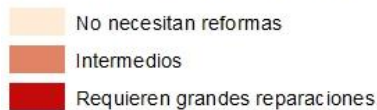
**Zonas Sísmicas en el distrito del Eixample**



*Figura 3.9. Zonas sísmicas sobre las que se sitúa el distrito del Eixample.*

- Código del estado de conservación: un pequeño porcentaje de edificios requieren grandes reparaciones. La mayor parte tienen un adecuado estado de conservación, e incluso muchos de ellos no necesitan ningún tipo de reforma (Figura 3.10).

**Estado de conservación de los edificios pertenecientes al distrito del Eixample**



*Figura 3.10. Estado de conservación de los edificios localizados en el distrito del Eixample.*

- Modificador relacionado con la posición que ocupa el edificio en la manzana: este modificador del índice de vulnerabilidad de la estructura se explica en el capítulo anterior.
- Modificador relacionado con diferencia de altura respecto a los edificios adyacentes: este modificador del índice de vulnerabilidad de la estructura se explica en el capítulo anterior.

### **Fuente de procedencia de la información**

La base de datos empleada para realizar el análisis de riesgo sísmico en el distrito del *Eixample* es la empleada por Lantada (2007). La mayor parte de los datos provienen del Instituto Municipal de Informática de Barcelona.

La cartografía de la ciudad se obtuvo del Sistema de Información Territorial de Barcelona (SITEB) de la *Subirecció de Informació Cartogràfica i de Base* del Ayuntamiento de Barcelona. De acuerdo a esta cartografía se delimitaron las manzanas, parcelas y subparcelas. Y se codificaron según la codificación estándar de catastro urbano del Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria del Ministerio de Economía y Hacienda (CGCCT). Además, a partir de los datos catastrales proporcionados por el SITEB se obtuvo la altura máxima de las parcelas.

El año de construcción de los edificios fue proporcionado por el Servicio de Protección Civil del Ayuntamiento de Barcelona. Y la tipología constructiva del edificio por el Instituto Municipal de Informática del Ayuntamiento de Barcelona.

Finalmente, el estado de conservación de los edificios fue proporcionado por el Sistema de Información Territorial de Barcelona (SITEB). Estos datos fueron recogidos por el Ayuntamiento gracias a la campaña de reformas y rehabilitaciones de edificios iniciada en el año 1986.



## 4. PROGRAMA USERISK 2011

### 4.1. Introducción de datos en el programa USERISK 2011

El programa USERISK 2011 permite estimar el riesgo sísmico de una zona urbana según las metodologías LM1 y LM1\_P. Para ello, se deben introducir datos en el programa sobre la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad del edificio.

Para caracterizar la peligrosidad sísmica de la zona urbana de estudio, se introduce en el programa la curva de peligrosidad sísmica específica de dicha zona. Esta función se debe obtener previamente con otro programa que así lo permita, como el programa CRISIS2008, o emplear curvas obtenidas en trabajos anteriores. Los valores de la curva de peligrosidad sísmica se introducen en el programa con un archivo de extensión “.txt” y con los datos que se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Información sobre la curva de peligrosidad sísmica necesaria para que el programa USERISK 2011 estime el riesgo sísmico.

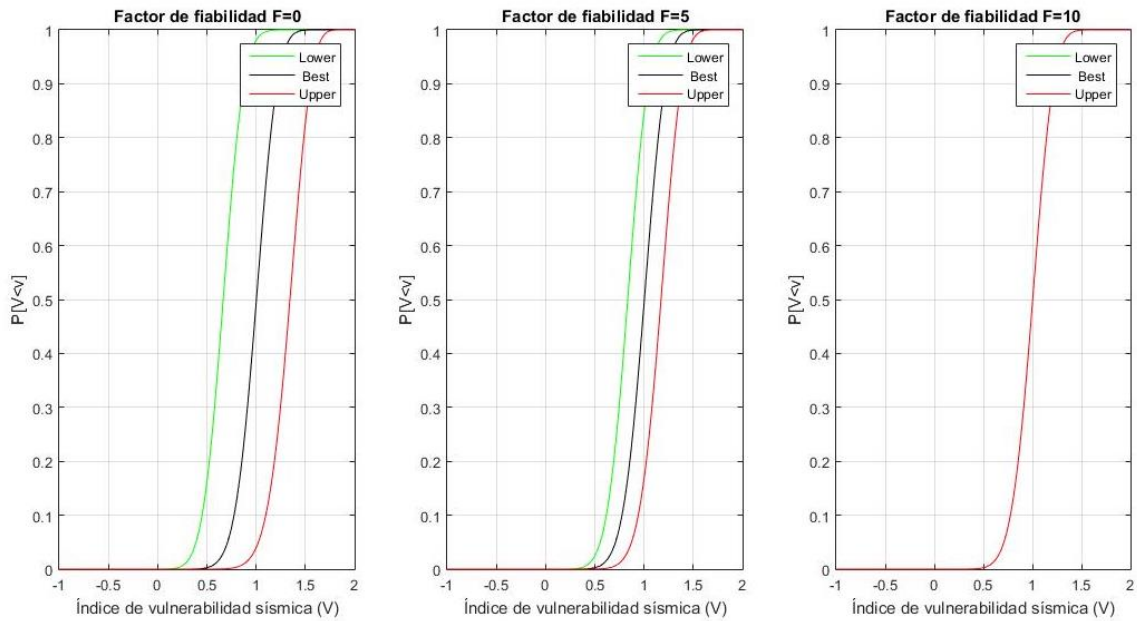
Orden en el archivo	Información
1	Número de puntos que definen a la curva de peligrosidad sísmica media- $\sigma$
2	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva de peligrosidad sísmica media- $\sigma$
3	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva de peligrosidad sísmica media- $\sigma$
4	Número de puntos que definen a la curva de peligrosidad sísmica media
5	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva de peligrosidad sísmica media
6	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva de peligrosidad sísmica media
7	Número de puntos que definen a la curva de peligrosidad sísmica media+ $\sigma$
8	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva de peligrosidad sísmica media+ $\sigma$
9	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva de peligrosidad sísmica media+ $\sigma$

El programa USERISK 2011 necesita conocer ciertas características del edificio para estimar la vulnerabilidad sísmica del mismo (Tabla 4.2). Estas características se deben introducir en un archivo con extensión “.csv”.

Además, es necesario especificar el valor del factor de fiabilidad de la tipología estructural. Este valor está comprendido entre 0 y 10 y hace referencia a las incertidumbres asociadas a la definición de la tipología estructural del edificio. Cuanto más cercano a 0 sea, menos fiables son los datos y, por consiguiente, cuanto más cercano a 10 sea, más exactos serán los mismos. En la Figura 4.1 se puede comprobar cómo varían las curvas de vulnerabilidad, acercándose o alejándose, a medida que varía el valor de este factor.

**Tabla 4.2.** Información sobre el edificio necesaria para que el programa USERISK 2011 estime la vulnerabilidad sísmica.

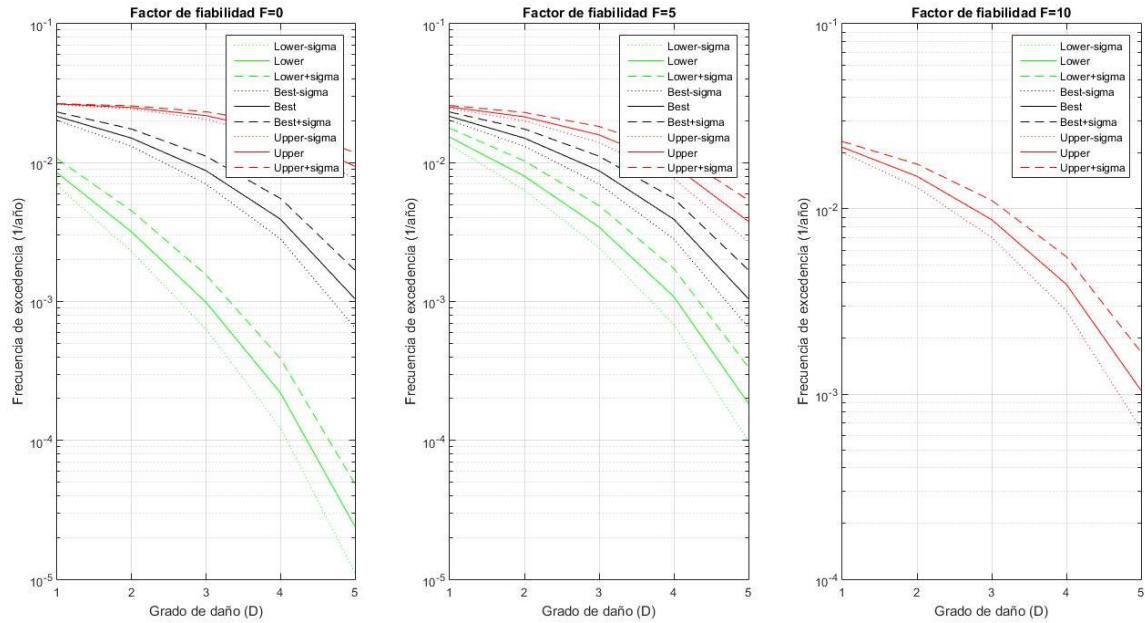
Orden en el archivo	Información sobre el edificio
1	Número de orden del edificio dentro de la base de datos
2	Código de identificación del edificio
3	Código de la parcela
4	Código de la manzana
5	Código de la zona ZRP
6	Código del barrio
7	Código del distrito
8	Área del edificio (m <sup>2</sup> )
9	Perímetro del edificio (m)
10	Número de niveles
11	Código de la tipología estructural
12	Factor de fiabilidad de la tipología estructural
13	Año de construcción
14	Zona sísmica
15	Código del estado de conservación
16	Código de la posición del edificio en la manzana
17	Código de la diferencia de la altura del edificio con respecto a la de los edificios adyacentes



**Figura 4.1.** Variación de las curvas de vulnerabilidad al cambiar el valor del factor de fiabilidad.

Se observa que cuando el factor de fiabilidad es igual a 10, valor máximo posible, las tres curvas coinciden exactamente. Y a medida que disminuye este valor, las curvas se van alejando. Al ser mayores las incertidumbres en los datos de partida, el índice de vulnerabilidad puede tomar más valores. Lo conveniente es reducir al máximo posible estas incertidumbres para que la determinación del índice de vulnerabilidad sea más exacta.

Lo mismo sucede con las curvas que representan el riesgo sísmico, se acercan o alejan a medida que varía el valor del factor de fiabilidad (Figura 4.2). Cuando el factor de fiabilidad es igual a 10, las curvas *Lower*, *Upper* y *Best* coinciden en una sola curva.



**Figura 4.2.** Variación de las curvas que representan el riesgo sísmico al cambiar el valor del factor de fiabilidad.

Se ha decidido otorgarle un valor de 7 al factor de fiabilidad, ya que la fuente de información de la base de datos es bastante fiable y se considera que los datos proporcionados se asemejan bastante con la realidad. Aunque se siguen considerando ciertas incertidumbres debido a los posibles errores que pueda tener la base de datos, así como, a la falta de aplicación en el programa de algunos modificadores importantes para la obtención del índice de vulnerabilidad final.

#### 4.2. Resultados obtenidos con el programa USERISK 2011

Tras introducir los datos y correr el programa, en pantalla se pueden visualizar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio y las curvas que expresan el riesgo sísmico en términos de frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño. A su vez se generan unos archivos con extensión “vuln1” y “dam1”. En las Tablas 4.3 y 4.4 se explican cada uno de los parámetros que contienen estos archivos.

**Tabla 4.3.** Información que contiene el archivo con extensión “vul1” generado con el programa USERISK 2011.

Tipo de información	Orden en el archivo	Descripción
<b>Datos</b>	1	Número de orden del edificio dentro de la base de datos
	2	Código de identificación del edificio
	3	Código de la parcela
	4	Código de la manzana
	5	Código de la zona censal ZRP
	6	Código del barrio
	7	Código del distrito
	8	Número de niveles
	9	Código de la tipología estructural
	10	Factor de la fiabilidad en la asignación de la tipología estructural
	11	Año de construcción
	12	Límite inferior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad
	13	Límite superior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad
<b>Resultados</b>	14	Parámetro alfa de la función de probabilidad beta de la curva inferior de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	15	Parámetro beta de la función de probabilidad beta de la curva inferior de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	16	Valor medio de la curva inferior de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	17	Desviación estándar de la curva inferior de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	18	Parámetro alfa de la función de probabilidad beta de la curva mejor de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	19	Parámetro beta de la función de probabilidad beta de la curva mejor de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	20	Valor medio de la curva mejor de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	21	Desviación estándar de la curva mejor de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	22	Parámetro alfa de la función de probabilidad beta de la curva superior de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	23	Parámetro beta de la función de probabilidad beta de la curva superior de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	24	Valor medio de la curva superior de vulnerabilidad sísmica del edificio.
	25	Desviación estándar de la curva superior de vulnerabilidad sísmica del edificio.

**Tabla 4.4.** Información que contiene el archivo con extensión “dam1” generado con el programa USERISK 2011.

Tipo de información	Orden en el archivo	Descripción
<b>Datos</b>	1	Número de orden del edificio dentro de la base de datos
	2	Código de identificación del edificio
	3	Código de la parcela
	4	Código de la manzana
	5	Código de la zona censal ZRP
	6	Código del barrio
	7	Código del distrito
	8	Número de niveles
	9	Código de la tipología estructural
	10	Factor de la fiabilidad en la asignación de la tipología estructural
	11	Año de construcción
	12	Zona sísmica
<b>Resultados</b>	13	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico inferior $-\sigma$
	14	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico inferior
	15	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico inferior $+\sigma$
	16	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico mejor $-\sigma$
	17	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico mejor
	18	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico mejor $+\sigma$
	19	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico superior $-\sigma$
	20	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico superior
	21	Frecuencias anuales de excedencia de los cinco estados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico superior $+\sigma$



## 5. RESULTADOS

En este capítulo se muestran en primer lugar, a modo de ejemplo, las características de dos edificios pertenecientes a la zona urbana de estudio con características estructurales distintas, para luego mostrar en los siguientes apartados los resultados obtenidos del análisis de riesgo sísmico en ambos. Seguidamente, se muestran los resultados obtenidos para todos los edificios de estudio representados mediante mapas con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica.

Como edificios ejemplo, se han elegido dos de las tres tipologías estructurales más predominantes en el distrito del *Eixample*. El primero de los edificios está situado dentro de la zona sísmica II, en la calle Mallorca (Figura 5.1). Es un edificio de mampostería no reforzada con forjados de madera (M.3.1). A este tipo de estructura se le asigna un índice de vulnerabilidad básico bastante alto,  $V^*_I=0,740$ , según establece el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).



**Figura 5.1.** Localización del edificio 1 dentro del distrito del *Eixample* (izquierda), su localización en la manzana (derecha) y fotografía de su fachada (derecha).

Casi la mitad de los edificios localizados en este distrito están registrados como edificios de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería (M.3.3). Por este motivo, se ha elegido un edificio de esta tipología estructural como segundo edificio ejemplo, considerándose como la tipología más representativa del

distrito. El índice de vulnerabilidad básico de esta tipología es más bajo que el de la tipología del edificio 1, aunque sigue siendo bastante alto,  $V^*_I=0,704$  (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). El edificio se localiza en la avenida Diagonal (Figura 5.2).

Las características específicas de cada uno de los edificios ejemplo, que son imprescindibles para la estimación del daño, se resumen en la Tabla 5.1.



**Figura 5.2.** Localización del edificio 2 dentro del distrito del Eixample (izquierda), su localización en la manzana (derecha) y fotografía de su fachada (derecha).

**Tabla 5.1.** Características específicas de los edificios ejemplo.

	Edificio 1	Edificio 2
Área del edificio en planta (m <sup>2</sup> )	300,8	193,9
Perímetro del edificio (m)	73,3	78,5
Número de niveles	6	6
Código de tipología estructural	M31	M33
Año de construcción	1896	1973
Estado de conservación	R	R
Modificador por la posición en la manzana	+0,04	-0,04
Modificador por diferencia de altura con los edificios adyacentes	0	0,02



Como se ha explicado en el cuarto capítulo de la memoria, se ha decidido tomar un valor de 7 como factor de fiabilidad para todos los edificios de la base de datos. Se ha tomado este valor ya que la base de datos es bastante fiable, aunque siguen existiendo ciertas incertidumbres.

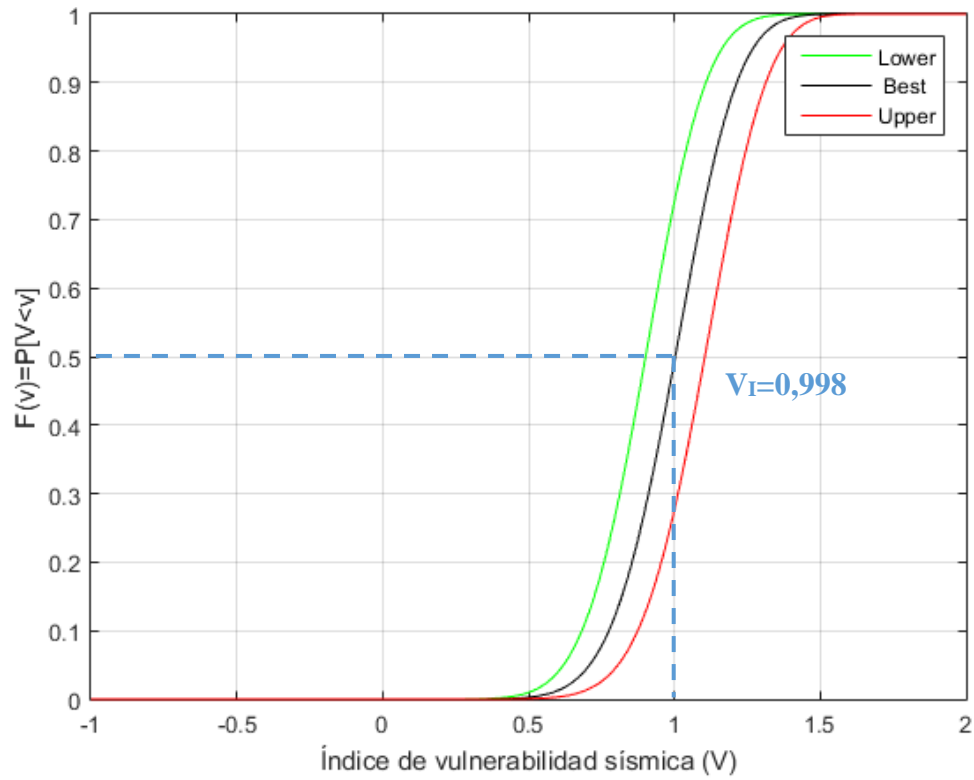
### 5.1. Vulnerabilidad sísmica

Con el programa USERISK, se han obtenido los valores alpha y beta de las curvas que representan la vulnerabilidad de los dos edificios. A continuación, empleando estos valores, se han representado las curvas de vulnerabilidad con el software matemático Matlab (Figuras 5.3 y 5.4).

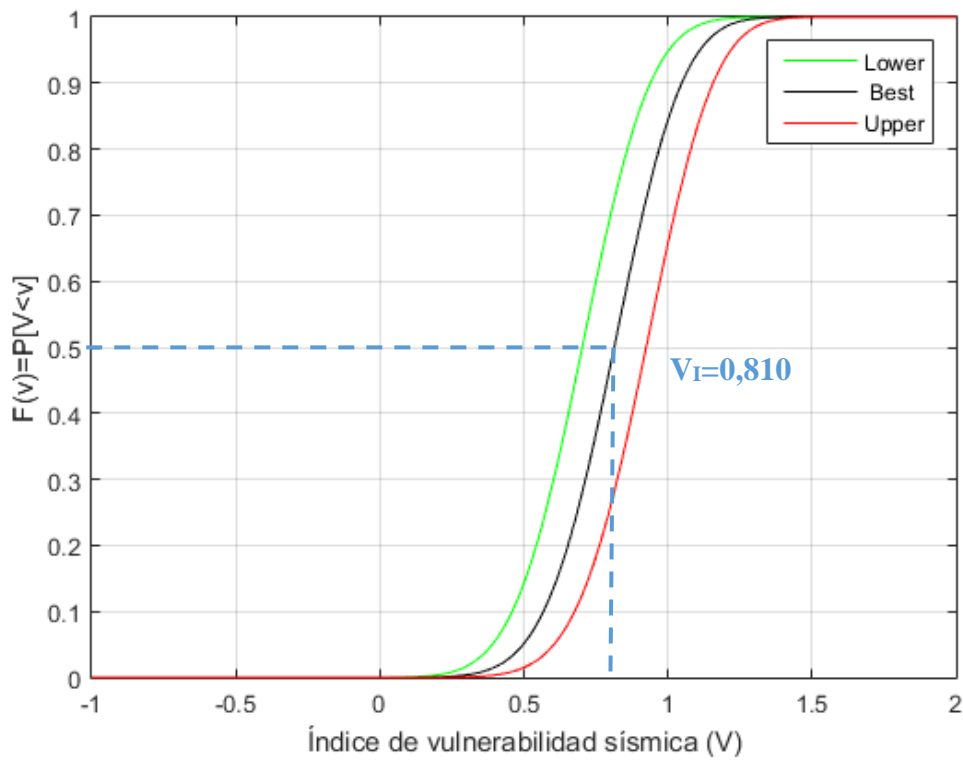
Los índices de vulnerabilidad sísmica de los dos edificios para una probabilidad del 50% y obtenidos para la curva con mejor estimación (*Best*) son de 0,998 y 0,810, respectivamente. Se ha comprobado que estos índices de vulnerabilidad coinciden con los obtenidos en el programa USERISK.

Las curvas *Lower* y *Upper* representan la vulnerabilidad de dos edificios con una tipología estructural distinta a la definida en los datos de partida. El índice de vulnerabilidad medio de estas dos curvas depende del valor de incertidumbre indicado en el archivo de datos, que en este caso es siempre 7. La curva *Lower* representa a un edificio con una tipología estructural de menor vulnerabilidad, mientras que la curva *Upper* representa a un edificio con una tipología estructural de mayor vulnerabilidad. Por consiguiente, el valor del índice de vulnerabilidad medio obtenido para la curva *Best*, en los dos edificios, es mayor que el obtenido para la curva *Lower* y menor que el obtenido con la curva *Upper*.

En la Tabla 5.2 se recogen los valores de los parámetros que definen las funciones de probabilidad Beta obtenidas para las tres curvas en los dos edificios.



**Figura 5.3.** Curvas de vulnerabilidad sísmica obtenidas para el edificio 1.



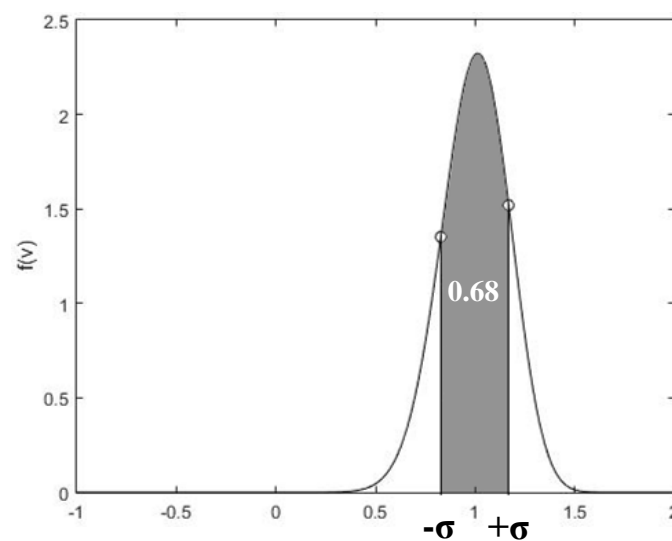
**Figura 5.4.** Curvas de vulnerabilidad sísmica obtenidas para el edificio 2.

**Tabla 5.2.** Parámetros de las funciones de probabilidad Beta para los edificios ejemplo.

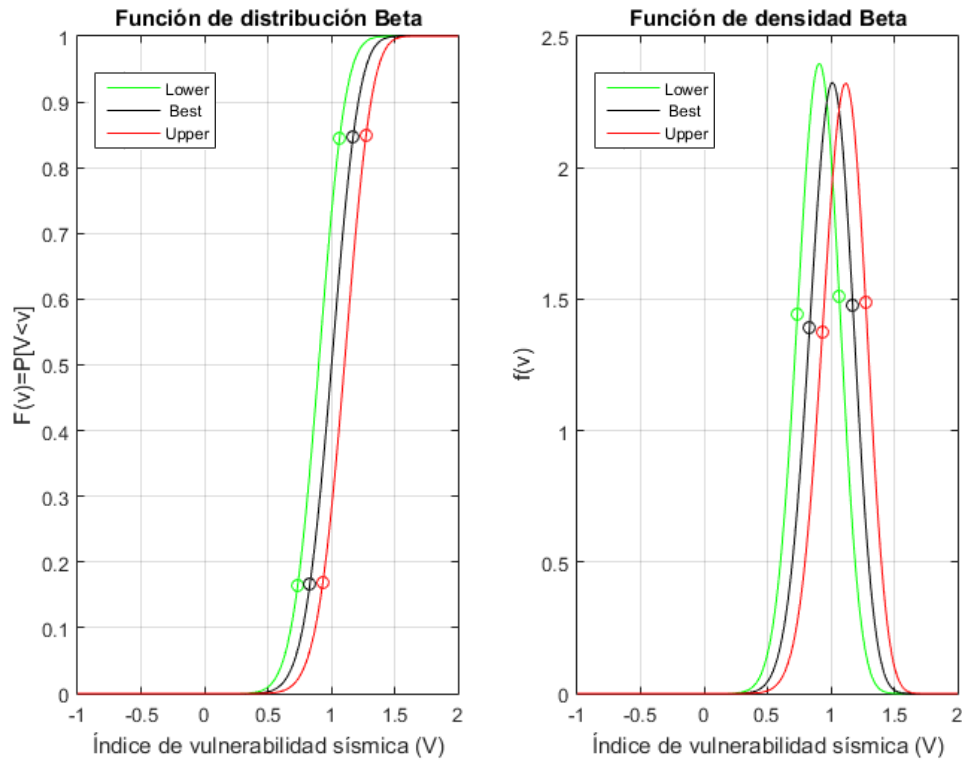
	Edificio 1			Edificio 2		
	<i>Lower</i>	<i>Best</i>	<i>Upper</i>	<i>Lower</i>	<i>Best</i>	<i>Upper</i>
$\alpha$	47,89	45,28	44,69	35,60	36,82	37,51
$\beta$	27,81	22,71	19,21	27,21	24,21	21,11
$\sigma$	0,165	0,170	0,171	0,186	0,186	0,187
$V_I$	0,898	0,998	1,098	0,700	0,810	0,920

Al tratarse de un estudio probabilista, no se puede afirmar que el valor medio del índice de vulnerabilidad sea el que represente realmente al edificio. Sino que existen ciertas incertidumbres en la obtención del mismo. Por ello, el índice de vulnerabilidad se debe representar con un intervalo de confianza, dando mayor importancia al valor medio.

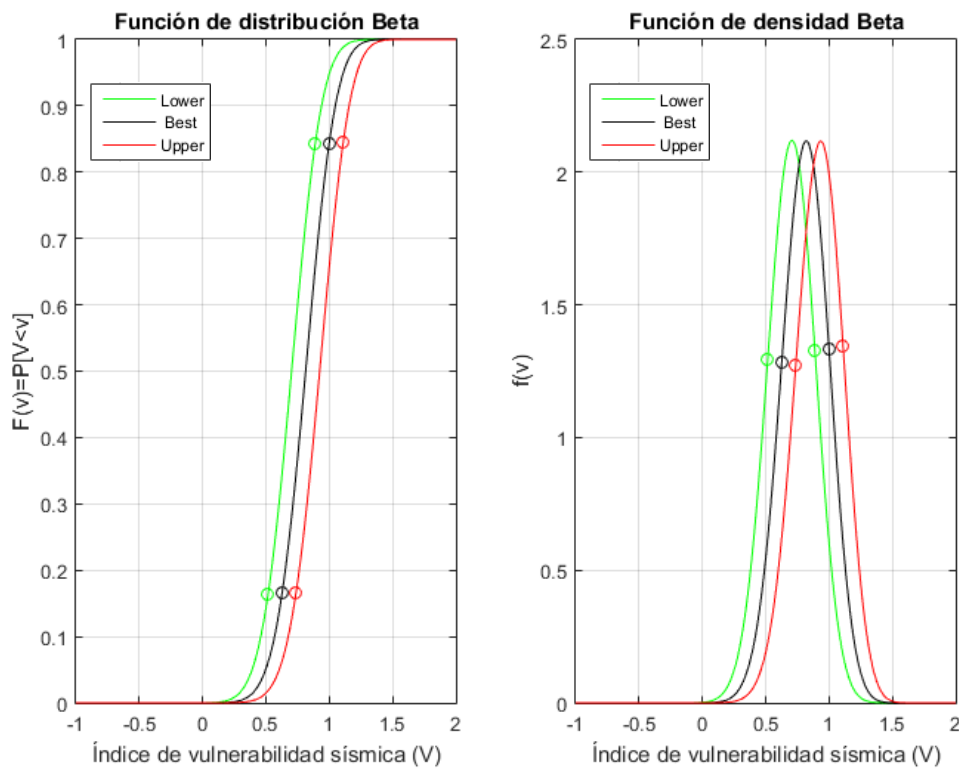
Los límites del intervalo se han calculado sumando y restando  $\sigma$  al valor obtenido para el 50% de probabilidad. De tal forma que los límites del intervalo contienen, aproximadamente, al 68% de la muestra (Figura 5.5). El límite inferior representa al percentil del 16%, mientras que el límite superior corresponde al percentil del 84%.

**Figura 5.5.** Intervalo de confianza de la función de vulnerabilidad empleado para obtener distintas matrices de daño.

Los puntos señalados en las Figuras 5.6 y 5.7 representan los valores máximos (percentil del 84%) y mínimos (percentil del 16%) que puede tomar el índice de vulnerabilidad en los dos edificios, para el intervalo de confianza elegido y para cada una de las tres curvas (*Lower*, *Best* y *Upper*). Estos valores se recogen en la Tabla 5.3.



**Figura 5.6.** Límite superior (percentil del 84%) e inferior (percentil del 16%) del intervalo de confianza del índice de vulnerabilidad definido para el edificio 1 y para las tres curvas.



**Figura 5.7.** Límite superior (percentil del 84%) e inferior (percentil del 16%) del intervalo de confianza del índice de vulnerabilidad definido para el edificio 2 y para las tres curvas.

**Tabla 5.3.** Valores de los índices de vulnerabilidad correspondientes al intervalo de confianza seleccionado para representar la vulnerabilidad en los dos edificios ejemplo.

	Percentil	Edificio 1			Edificio 2		
		<i>Lower</i>	<i>Best</i>	<i>Upper</i>	<i>Lower</i>	<i>Best</i>	<i>Upper</i>
<b><math>V_{I-\sigma}</math></b>	16%	0,736	0,832	0,934	0,517	0,627	0,738
<b><math>V_I</math></b>	50%	0,898	0,998	1,098	0,700	0,810	0,920
<b><math>V_{I+\sigma}</math></b>	84%	1,067	1,173	1,275	0,889	1,000	1,111

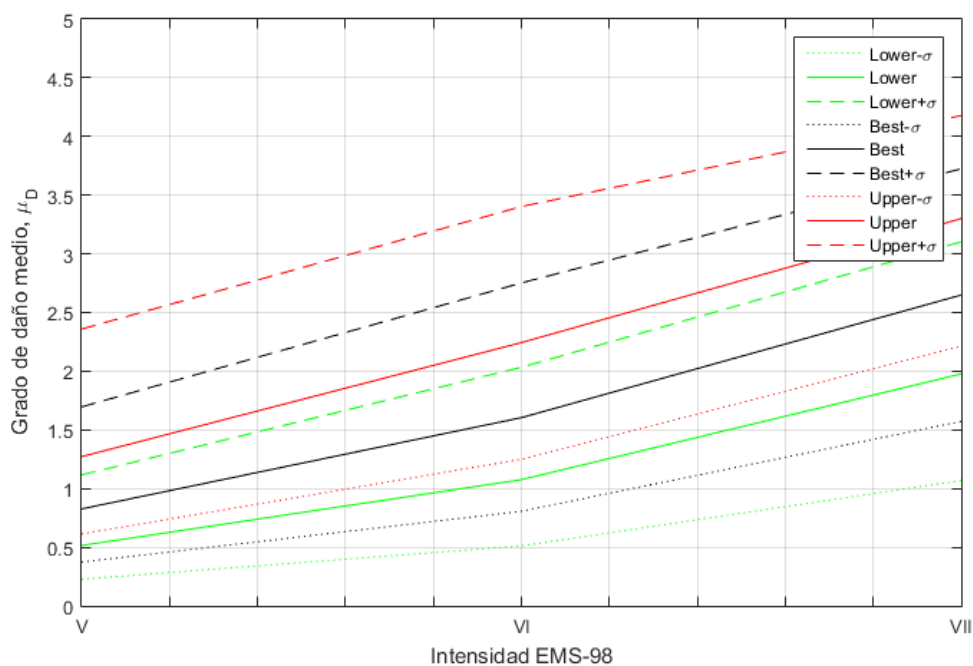
Como norma general, se suele emplear el percentil del 50% en estudios de riesgo sísmico. Sin embargo, con las curvas de vulnerabilidad es posible analizar los datos para cualquier otro percentil, como se ha demostrado.

Finalmente, se puede afirmar que en el edificio 2, independientemente del percentil que se analice, las diferencias entre las curvas *Lower* y *Upper*, son mayores que en el edificio 1, es decir, las incertidumbres son mayores.

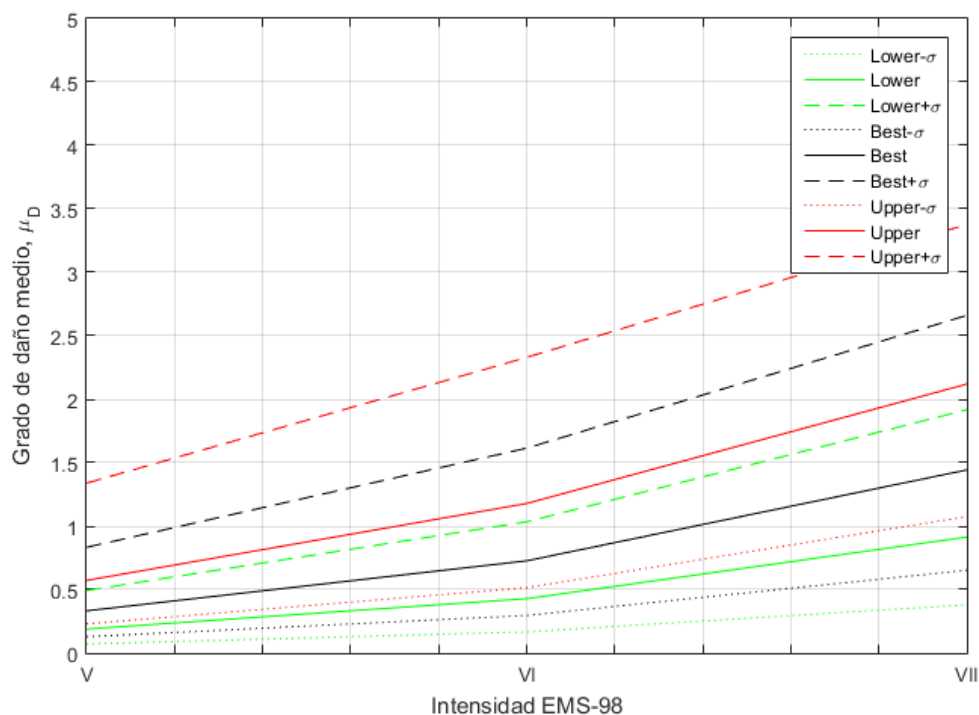
## 5.2. Matrices de probabilidad de daño

Con cada uno de los índices de vulnerabilidad recogidos en la Tabla 5.3, se ha calculado el índice de daño medio esperado en ambos edificios al verse sometidos al movimiento generado por sismos de distintos grados de intensidad (Figuras 5.8 y 5.9). Se han elegido los grados de intensidad V, VI y VII en la escala de intensidad macrosísmica EMS-98, ya que son los grados de intensidad considerados más probables en la ciudad de Barcelona, que pueden provocar daños. En ambas figuras, la curva de daño medio representada con una línea continua de color negro, es la que representa el valor más probable del daño. Con la línea negra discontinua y la línea negra de puntos se representa el valor máximo y mínimo del daño medio esperado en el edificio, según el intervalo de confianza elegido. Las curvas representadas en color verde muestran el daño medio en un edificio con una tipología estructural menos vulnerable que la definida. Mientras que las curvas rojas representan el daño medio en un edificio con una tipología más vulnerable.

En la Tabla 5.4 se recogen los valores del índice de daño medio representados en las gráficas.



**Figura 5.8.** Curvas que representan el grado de daño medio en función de la intensidad en el edificio 1.



**Figura 5.9.** Curvas que representan el grado de daño medio en función de la intensidad en el edificio 2.

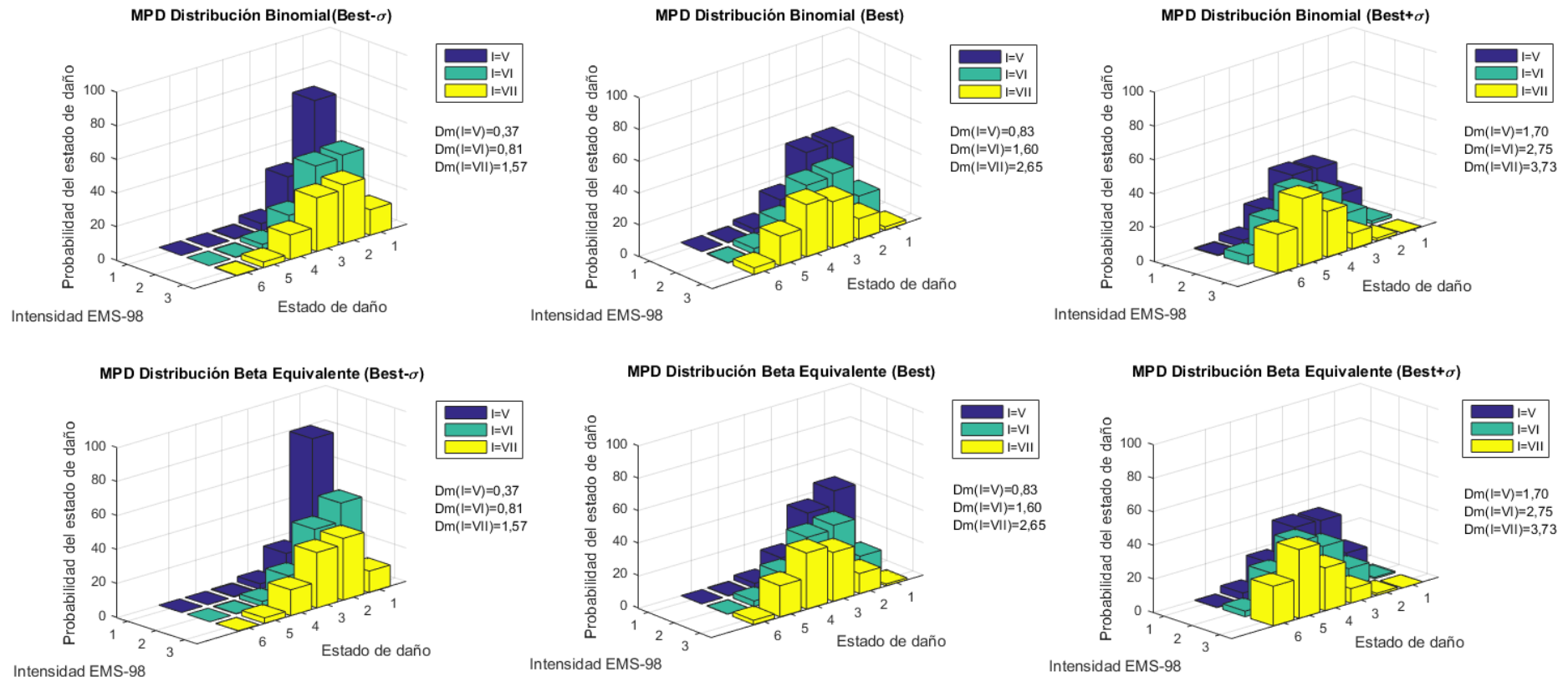
**Tabla 5.4.** Índice de daño medio para todos los índices de vulnerabilidad considerados en los dos edificios y las intensidades V, VI y VII.

	Percentil	Edificio 1			Edificio 2		
		V	VI	VII	V	VI	VII
$\mu_D$ (Lower - $\sigma$ )	16%	0,23	0,51	1,07	0,07	0,17	0,38
$\mu_D$ (Lower)	50%	0,52	1,08	1,98	0,19	0,43	0,91
$\mu_D$ (Lower + $\sigma$ )	84%	1,12	2,03	3,10	0,49	1,03	1,92
$\mu_D$ (Best - $\sigma$ )	16%	0,37	0,81	1,57	0,13	0,30	0,65
$\mu_D$ (Best)	50%	0,83	1,60	2,65	0,33	0,73	1,44
$\mu_D$ (Best + $\sigma$ )	84%	1,70	2,75	3,73	0,83	1,61	2,66
$\mu_D$ (Upper - $\sigma$ )	16%	0,61	1,25	2,21	0,23	0,52	1,08
$\mu_D$ (Upper)	50%	1,27	2,24	3,30	0,57	1,18	2,12
$\mu_D$ (Upper + $\sigma$ )	84%	2,36	3,40	4,18	1,34	2,33	3,38

Una vez obtenido el grado de daño medio en la estructura para distintos niveles de la acción sísmica, es posible calcular la matriz de probabilidad de daño. Esta matriz está formada por las probabilidades de que se sufran los distintos estados de daño al intervenir distintos niveles de la acción sísmica. Como se ha explicado en el tercer capítulo, el daño sigue una distribución Binomial o Beta equivalente.

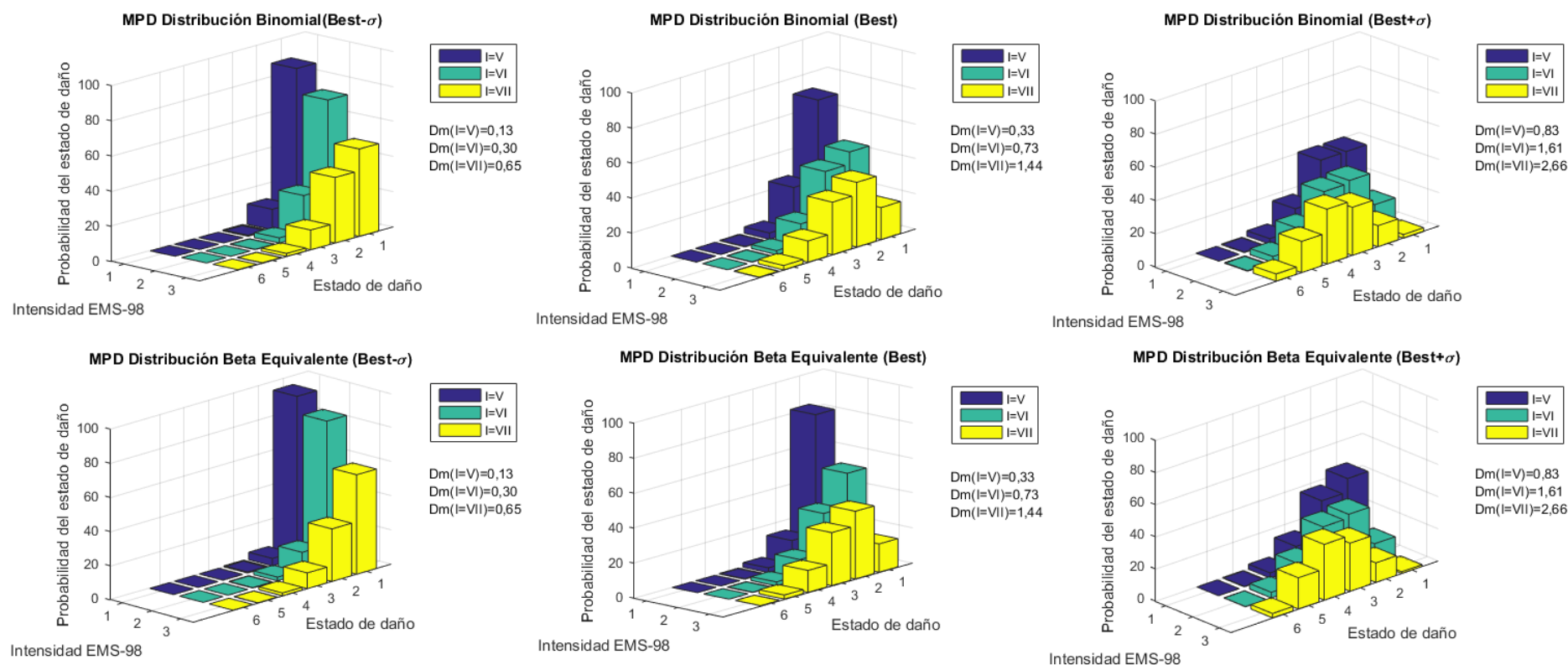
Se han obtenido las matrices de probabilidad de daño mediante las dos distribuciones y se ha comprobado que los resultados obtenidos son similares. Para ello, se ha empleado el grado de daño medio obtenido para la curva *Best* y para las curvas que representan los valores máximo y mínimo del daño en el edificio de la tipología definida (*Best*+ $\sigma$  y *Best*- $\sigma$ ). De tal forma que es posible tener una visión de la posible distribución del daño en los dos edificios con la tipología estructural y las características propias definidas al inicio (Figuras 5.10 y 5.11).

En las Tablas 5.5 y 5.6 se recogen los valores obtenidos con las dos distribuciones en los dos edificios. Como era de esperar, las probabilidades son distintas, pero los valores son del mismo orden.



**Figura 5.10.** Representación de las matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de izquierda a derecha) del daño promedio en el edificio 1, considerando la curva que representa la mejor estimación (Best). Obtenidas con la distribución Binomial (arriba) y con la distribución Beta equivalente (abajo).





**Figura 5.11.** Representación de las matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de izquierda a derecha) del daño promedio en el edificio 2, considerando la curva que representa la mejor estimación (Best). Obtenidas con la distribución Binomial (arriba) y con la distribución Beta equivalente (abajo).

**Tabla 5.5.** Matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de abajo a arriba) del daño promedio en el edificio 1, considerando la curva que representa la mejor estimación (*Best*). Obtenidas con la distribución Binomial (izquierda) y con la distribución Beta equivalente (derecha).

Estados de daño	Intensidades							
	Binomial ( <i>Best-σ</i> )				Beta ( <i>Best-σ</i> )			
		V	VI	VII		V	VI	VII
	0	0,6788	0,4151	0,1514	0	0,7963	0,4717	0,1262
	1	0,2735	0,3990	0,3473	1	0,1665	0,3628	0,3636
	2	0,0441	0,1534	0,3186	2	0,0328	0,1339	0,3258
	3	0,0036	0,0295	0,1461	3	0,0042	0,0289	0,1515
	4	0,0001	0,0028	0,0335	4	0,0002	0,0027	0,0317
	5	0,0000	0,0001	0,0031	5	0,0000	0,0000	0,0012
	Binomial ( <i>Best</i> )				Beta ( <i>Best</i> )			
		V	VI	VII		V	VI	VII
	0	0,4053	0,1445	0,0230	0	0,4581	0,1187	0,0115
	1	0,4012	0,3413	0,1294	1	0,3685	0,3572	0,1236
	2	0,1589	0,3225	0,2917	2	0,1396	0,3305	0,3013
	3	0,0315	0,1523	0,3288	3	0,0308	0,1582	0,3457
	4	0,0031	0,0360	0,1853	4	0,0029	0,0341	0,1915
	5	0,0001	0,0034	0,0418	5	0,0000	0,0014	0,0264
	Binomial ( <i>Best+σ</i> )				Beta ( <i>Best+σ</i> )			
		V	VI	VII		V	VI	VII
	0	0,1260	0,0184	0,0011	0	0,0990	0,0088	0,0003
	1	0,3234	0,1124	0,0157	1	0,3373	0,1060	0,0129
	2	0,3320	0,2753	0,0920	2	0,3423	0,2832	0,0863
	3	0,1704	0,3371	0,2689	3	0,1777	0,3536	0,2550
	4	0,0437	0,2064	0,3928	4	0,0418	0,2150	0,4094
	5	0,0045	0,0505	0,2295	5	0,0019	0,0334	0,2361

**Tabla 5.6.** Matrices de probabilidad de daño calculadas para el valor mínimo, medio y máximo (de abajo a arriba) del daño promedio en el edificio 2, considerando la curva que representa la mejor estimación (*Best*). Obtenidas con la distribución Binomial (izquierda) y con la distribución Beta equivalente (derecha).

Intensidades								
Estados de daño	Binomial ( <i>Best-σ</i> )			Beta ( <i>Best-σ</i> )				
	V	VI	VII	V	VI	VII		
	0	0,8780	0,7370	0,4969	0	0,9504	0,8510	0,5825
	1	0,1158	0,2319	0,3730	1	0,0434	0,1247	0,3076
	2	0,0061	0,0292	0,1120	2	0,0057	0,0217	0,0920
	3	0,0002	0,0018	0,0168	3	0,0005	0,0025	0,0166
	4	0,0000	0,0001	0,0013	4	0,0000	0,0001	0,0013
	5	0,0000	0,0000	0,0000	5	0,0000	0,0000	0,0000
	Binomial ( <i>Best</i> )			Beta ( <i>Best</i> )				
	V	VI	VII	V	VI	VII		
	0	0,7088	0,4560	0,1822	0	0,8254	0,5278	0,1615
1	0,2526	0,3877	0,3696	1	0,1445	0,3367	0,3868	
2	0,0360	0,1319	0,2999	2	0,0267	0,1116	0,3028	
3	0,0026	0,0224	0,1217	3	0,0032	0,0220	0,1251	
4	0,0001	0,0019	0,0247	4	0,0002	0,0019	0,0231	
5	0,0000	0,0001	0,0020	5	0,0000	0,0000	0,0008	
Binomial ( <i>Best+σ</i> )			Beta ( <i>Best+σ</i> )					
V	VI	VII	V	VI	VII			
0	0,4021	0,1423	0,0224	0	0,4537	0,1163	0,0112	
1	0,4018	0,3393	0,1274	1	0,3703	0,3550	0,1215	
2	0,1606	0,3237	0,2899	2	0,1415	0,3320	0,2993	
3	0,0321	0,1544	0,3299	3	0,0315	0,1604	0,3468	
4	0,0032	0,0368	0,1877	4	0,0030	0,0349	0,1942	
5	0,0001	0,0035	0,0427	5	0,0000	0,0014	0,0271	

Si se analizan los resultados obtenidos con ambas distribuciones, las probabilidades más parecidas se obtienen con la curva que representa el mayor índice de daño medio y para el grado de intensidad VII. Cuando el índice de daño medio es pequeño, la solución más

conservadora es la obtenida con la distribución Binomial. Por el contrario, cuando el índice de daño medio es muy grande, la distribución Beta equivalente obtiene unas probabilidades que, por lo general, son más conservadoras.

Finalmente, se ha elegido la solución obtenida con la distribución Binomial para realizar el análisis de los datos, ya que los parámetros de la distribución Beta se han ajustado para que la solución sea equivalente a la obtenida con la distribución Binomial. Si para obtener el parámetro  $r$  de la distribución Beta se hubiera empleado un polinomio de grado seis o de grado nueve las soluciones serían más similares e incluso coincidirían.

Con estos resultados, se puede afirmar que si un edificio con la tipología estructural y las características propias definidas para el edificio 1, estuviera sometido a un terremoto de intensidad VI, el daño mínimo previsible más probable es la ausencia de daño o el daño *leve* y el máximo es el daño *moderado* o el daño *severo*. Sin embargo, el daño más probable es un daño *leve* o *moderado*. En el edificio 2, el daño mínimo previsible más probable es la ausencia de daño y el máximo es el daño *leve* o *moderado*. Sin embargo, el daño más probable es la ausencia de daño o el daño *leve*.

Finalmente, es posible afirmar que, si los dos edificios analizados se sometieran en las mismas condiciones a un sismo de una cierta intensidad, el edificio 1 sufriría mayores daños que el edificio 2.

### 5.3. Riesgo sísmico

Con el programa USERISK 2011 se han obtenido las curvas que representan la frecuencia anual de excedencia de cada estado de daño y su correspondiente periodo de retorno, para cada uno de los edificios ejemplo (Figuras 5.9). El programa emplea para ello las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, las curvas de vulnerabilidad del edificio y las matrices de probabilidad de daño.

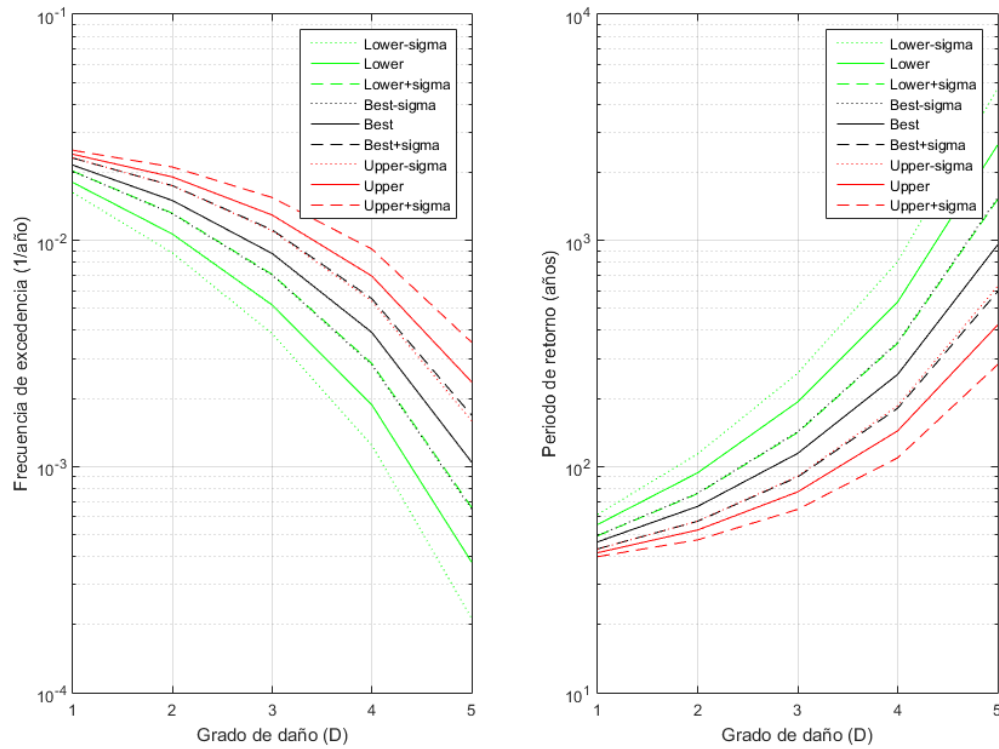
Estos valores, recogidos en las Tablas 5.7 y 5.8, se han introducido en el programa Matlab y se han obtenido las Figuras 5.12 y 5.13.

**Tabla 5.7.** Frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y periodos de retorno en el edificio 1.

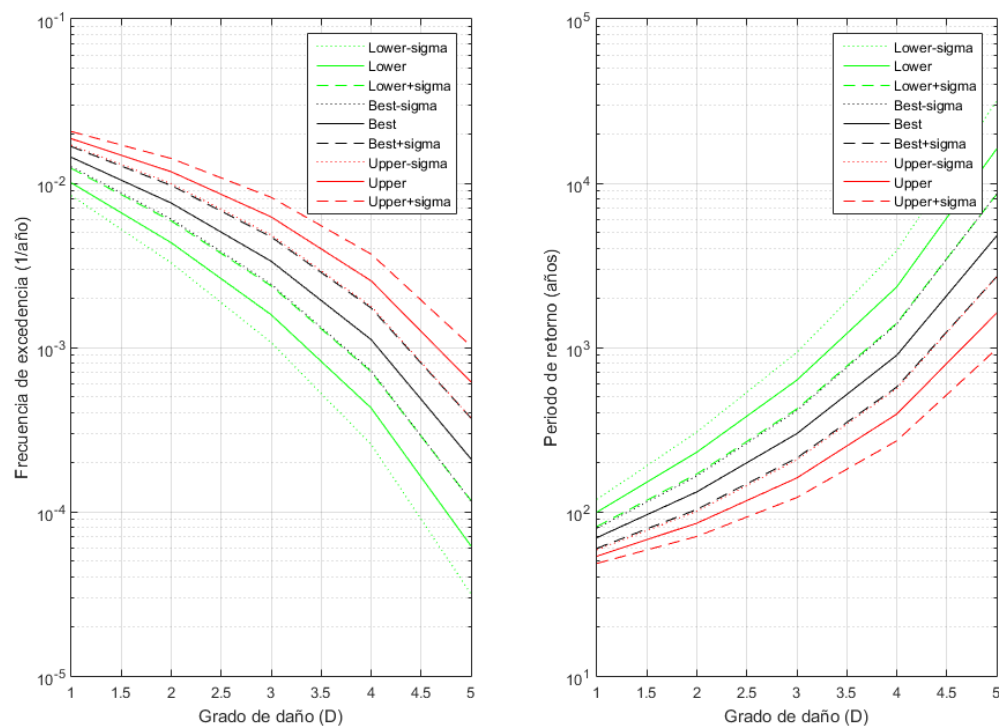
		D1 - Leve	D2 - Moderado	D3 - Severo	D4 - Muy severo	D5 - Completo
<b>Lower-<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01628	0,00879	0,00387	0,00124	0,00021
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	61	114	259	806	4693
<b>Lower</b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01803	0,01066	0,00518	0,00187	0,00038
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	55	94	193	534	2647
<b>Lower+<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02024	0,01318	0,00707	0,00285	0,00066
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	49	76	141	351	1518
<b>Best-<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02017	0,01311	0,00702	0,00282	0,00065
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	50	76	143	355	1544
<b>Best</b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02152	0,01501	0,00875	0,00391	0,00105
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	46	67	114	256	956
<b>Best+<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02313	0,01746	0,01113	0,00552	0,00169
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	43	57	90	181	594
<b>Upper-<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02316	0,01744	0,01103	0,00539	0,00159
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	43	57	91	186	628
<b>Upper</b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02405	0,01908	0,01295	0,00695	0,00237
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	42	52	77	144	423
<b>Upper+<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02504	0,02111	0,01547	0,00915	0,00354
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	40	47	65	109	282

**Tabla 5.8.** Frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y periodos de retorno en el edificio 2.

		D1 - Leve	D2 - Moderado	D3 - Severo	D4 - Muy severo	D5 - Completo
<b>Lower-<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,00841	0,00327	0,00107	0,00026	0,00003
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	119	306	933	3890	31683
<b>Lower</b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01006	0,00434	0,00158	0,00043	0,00006
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	99	230	632	2336	16183
<b>Lower+<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01230	0,00589	0,00237	0,00071	0,00012
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	81	170	422	1405	8562
<b>Best-<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01260	0,00605	0,00243	0,00072	0,00012
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	79	165	412	1385	8609
<b>Best</b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01438	0,00757	0,00335	0,00112	0,00021
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	70	132	299	896	4775
<b>Best+<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01671	0,00968	0,00471	0,00174	0,00037
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	60	103	212	575	2697
<b>Upper-<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01705	0,00994	0,00484	0,00178	0,00037
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	59	101	207	563	2689
<b>Upper</b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,01865	0,01174	0,00623	0,00254	0,00062
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	54	85	160	393	1621
<b>Upper+<math>\sigma</math></b>	Frecuencia de excedencia (1/año)	0,02064	0,01415	0,00820	0,00370	0,00102
	Periodo de retorno $T_r$ (años)	48	71	122	270	982



**Figura 5.12.** Curvas que representan las frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y los periodos de retorno correspondientes en el edificio 1.



**Figura 5.13.** Curvas que representan las frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño y los periodos de retorno correspondientes en el edificio 2.

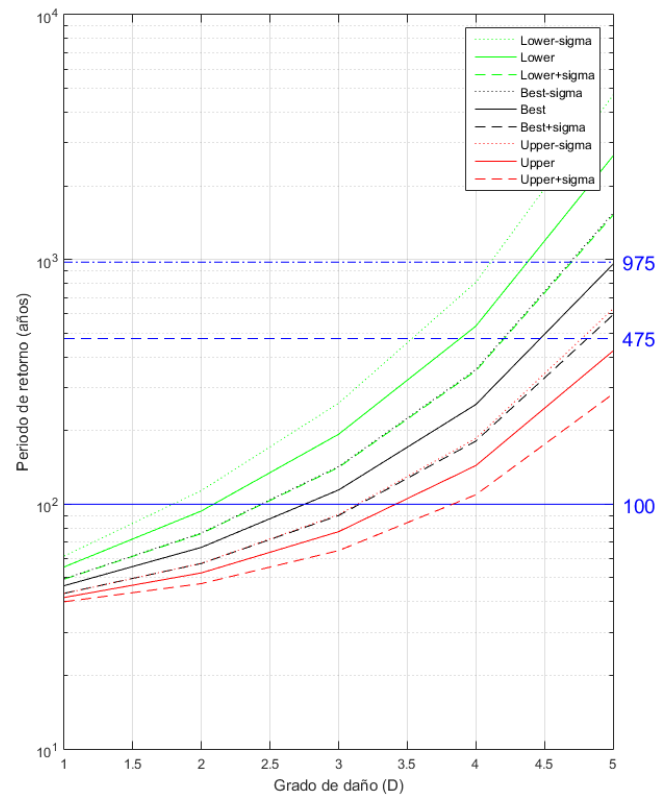
El grado de daño *moderado* en el edificio 1 tiene un periodo de retorno que varía entre 57 y 76 años, considerando que se ha definido de manera correcta la tipología estructural del edificio y el resto de características concretadas al inicio (*Best*). Si la tipología fuera menos vulnerable que la definida (*Lower*), el periodo de retorno del daño *moderado* variaría entre 76 y 114 años. Sin embargo, si la tipología estructural del edificio fuera más vulnerable (*Upper*), el periodo de retorno estaría comprendido entre 47 y 57 años. No obstante, el periodo de retorno medio, considerando una correcta estimación de la tipología, es de 67 años.

En el edificio 2, el periodo de retorno del daño *moderado* varía entre 103 y 165 años, considerando una correcta definición de la tipología (*Best*). Para una tipología menos vulnerable (*Lower*) el periodo de retorno varía entre 170 y 306 años y para una más vulnerable (*Upper*) entre 71 y 101 años. Por último, el periodo de retorno medio para la mejor estimación es de 132 años.

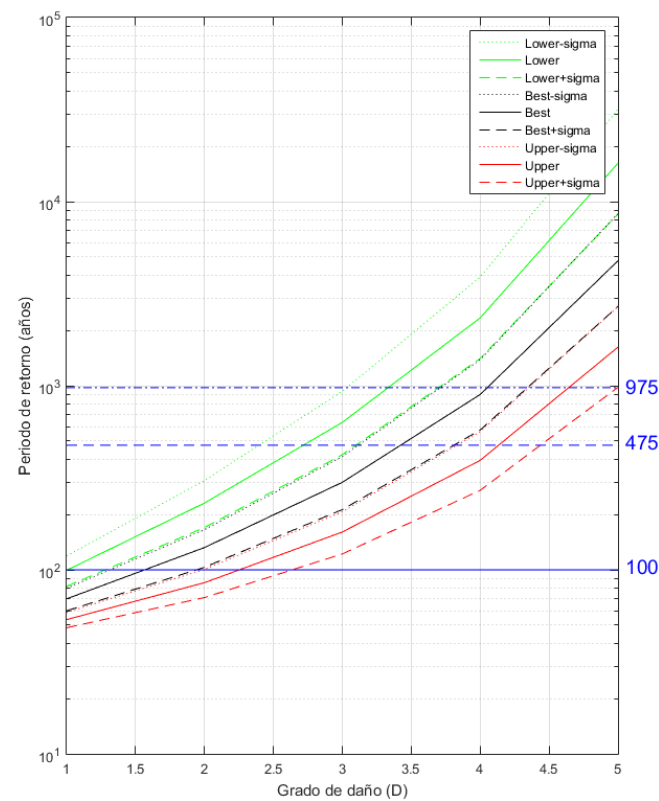
De este análisis se concluye que el edificio 1 puede sufrir daños en su estructura cada menos tiempo que el edificio 2, es decir, tiene mayor frecuencia de excedencia de daño. Aproximadamente, la frecuencia anual de excedencia de daño en el edificio 1 es el doble que la del edificio 2.

De igual forma, es posible analizar el grado de daño correspondiente a distintos periodos de retorno (Figuras 5.14 y 5.15). Para un periodo de retorno de 100 años y considerando una correcta estimación de la tipología (*Best*), el daño en el edificio 1 está comprendido entre *moderado* y *severo*, cuyo valor más probable es un daño *severo*. En el edificio 2, se obtiene un daño menor, comprendido entre *leve* y *moderado*, cuyo valor más probable es un daño más próximo a *moderado*. Si se analiza el daño asociado a un periodo de retorno de 475 años, se comprueba que el daño en el edificio 1 está comprendido entre *muy severo* y *completo*, cuyo valor más probable es un daño *muy severo*. Mientras que en el edificio 2, está asociado a un daño entre *severo* y *muy severo*, siendo más probable el daño *severo*.





**Figura 5.14.** Grados de daño asociados a distintos periodos de retorno en el edificio 1.



**Figura 5.15.** Grados de daño asociados a distintos periodos de retorno en el edificio 2.

## 5.4. Escenarios de riesgo sísmico

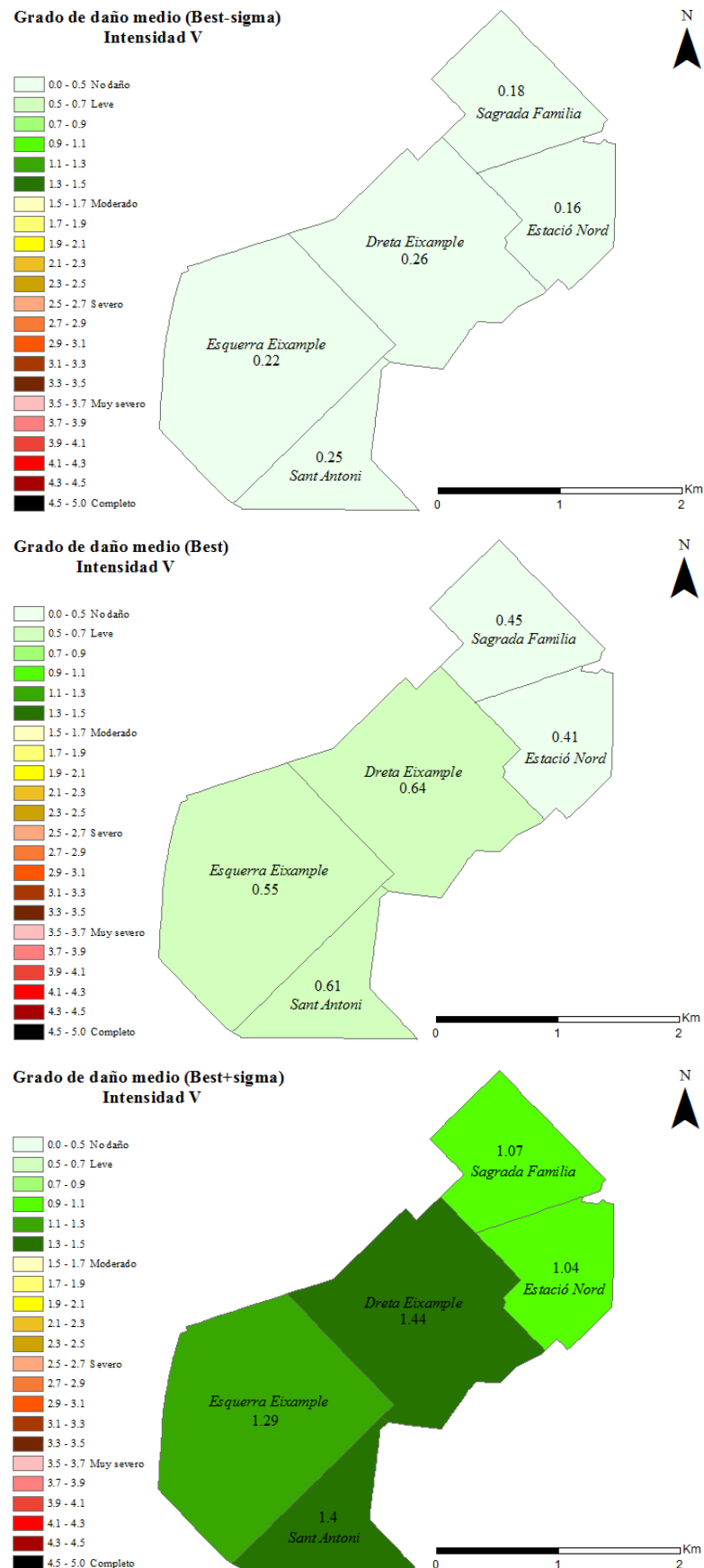
En este apartado se representan cartográficamente los resultados obtenidos del análisis de riesgo sísmico teniendo en cuenta todos los edificios residenciales en el distrito de estudio. Se muestra tanto el daño en los edificios como los costes y pérdidas humanas esperadas en cada uno de los barrios del distrito.

### 5.4.1. Índice de daño medio

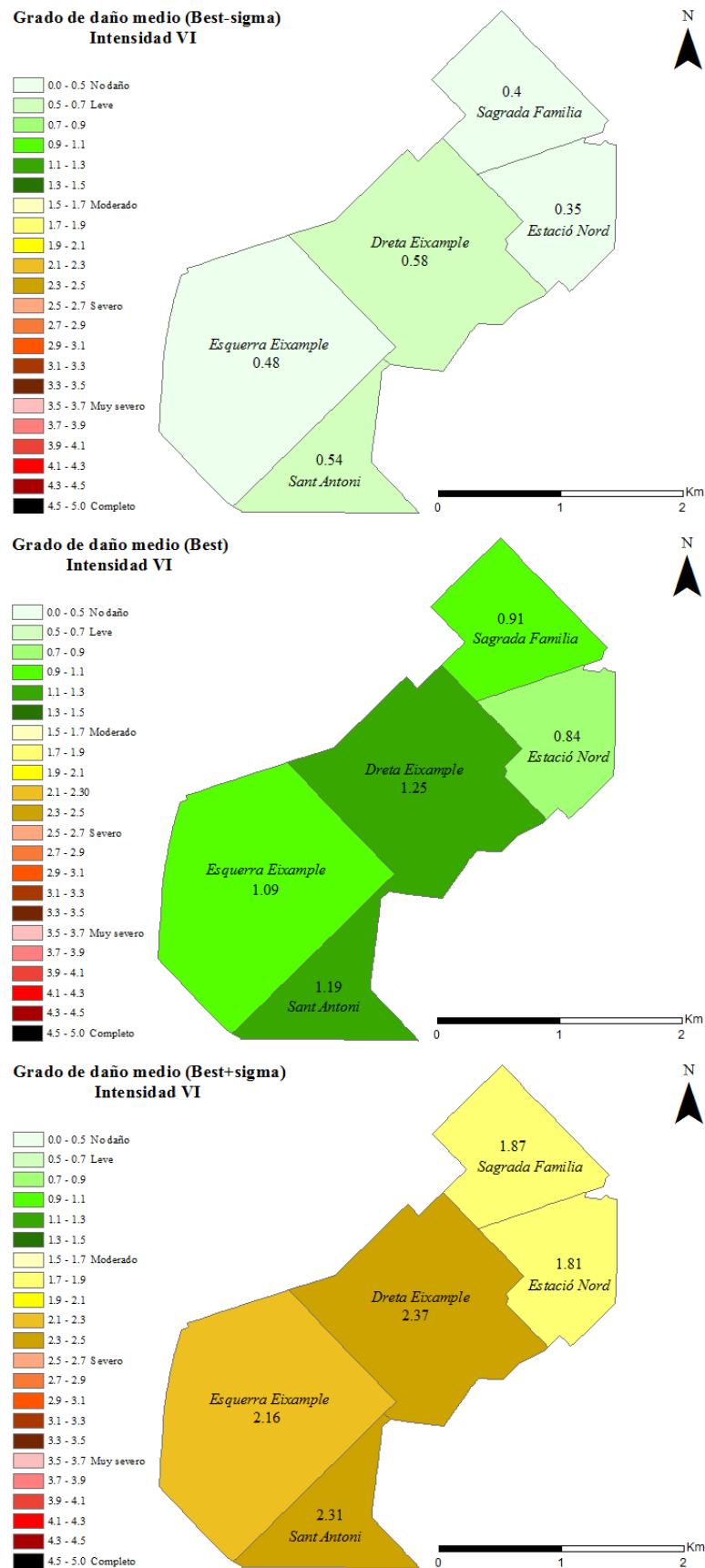
En la Tabla 5.9 se recogen los valores del índice de daño medio, obtenidos en cada uno de los barrios del distrito del *Eixample*, para distintas intensidades sísmicas (Figuras 5.16, 5.17 y 5.18). Se ha empleado el valor máximo, mínimo y medio del daño, considerando una correcta definición de la tipología estructural (*Best*).

**Tabla 5.9.** Resultados del índice de daño medio por barrio para distintos grados de intensidad sísmica.

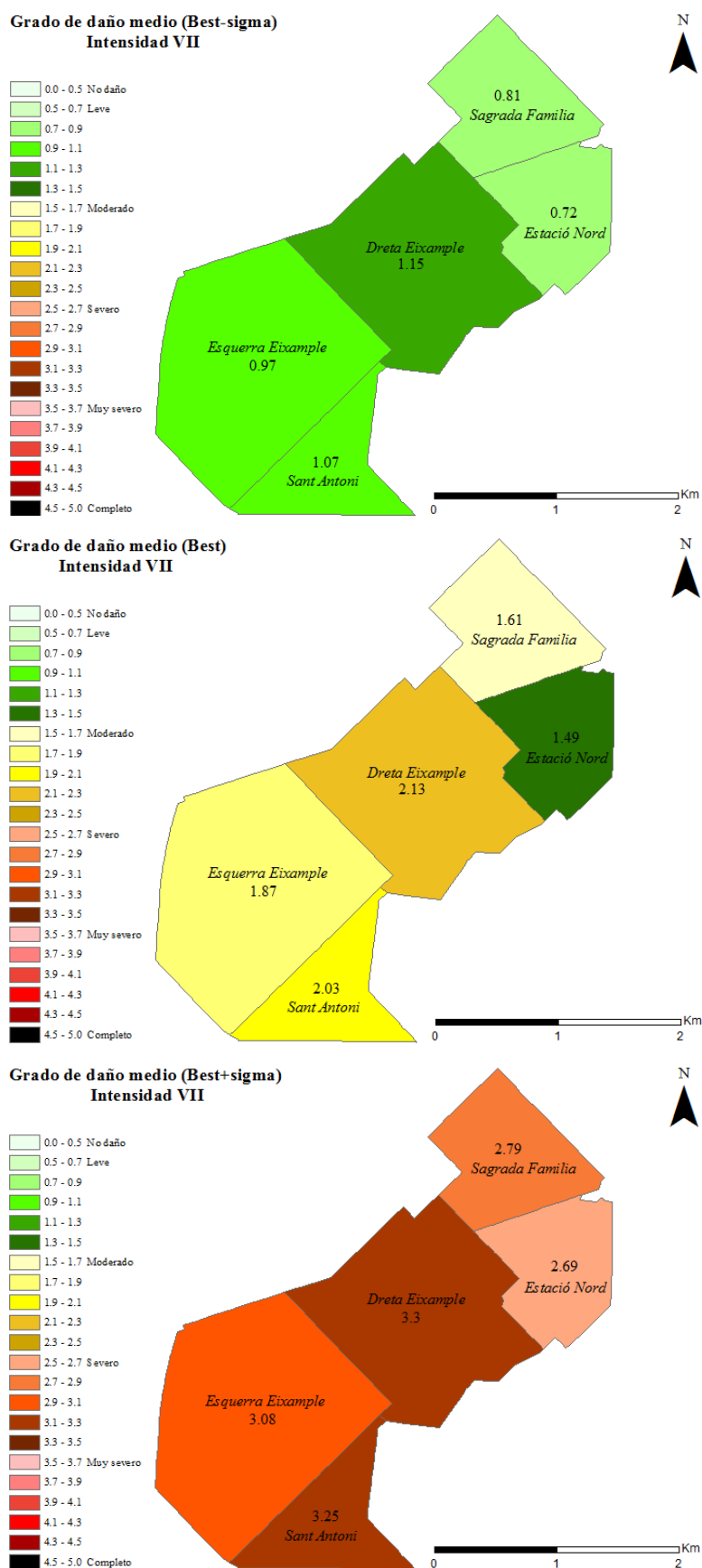
		Percentil	V	VI	VII
<b>Dreta Eixample</b>	<i>Best-σ</i>	16%	0,26	0,58	1,15
	<i>Best</i>	50%	0,64	1,25	2,13
	<i>Best+σ</i>	84%	1,44	2,37	3,30
<b>Esquerra Eixample</b>	<i>Best-σ</i>	16%	0,22	0,48	0,97
	<i>Best</i>	50%	0,55	1,09	1,87
	<i>Best+σ</i>	84%	1,29	2,16	3,08
<b>Estació Nord</b>	<i>Best-σ</i>	16%	0,16	0,35	0,72
	<i>Best</i>	50%	0,41	0,84	1,49
	<i>Best+σ</i>	84%	1,04	1,81	2,69
<b>Sagrada Familia</b>	<i>Best-σ</i>	16%	0,18	0,40	0,81
	<i>Best</i>	50%	0,45	0,91	1,61
	<i>Best+σ</i>	84%	1,07	1,87	2,79
<b>Sant Antoni</b>	<i>Best-σ</i>	16%	0,25	0,54	1,07
	<i>Best</i>	50%	0,61	1,19	2,03
	<i>Best+σ</i>	84%	1,40	2,31	3,25



**Figura 5.16.** Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad V. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y la mejor estima del daño (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.



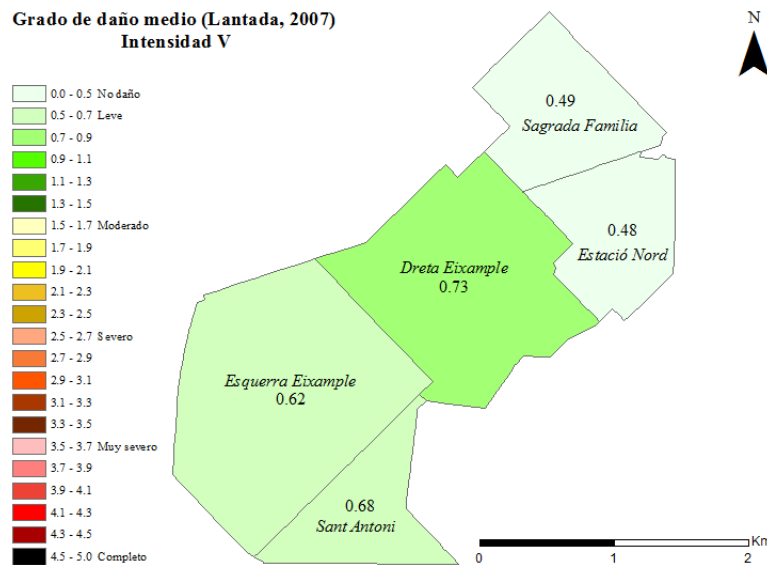
**Figura 5.17.** Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VI. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y la mejor estima del daño (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.



**Figura 5.18.** Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VII. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y la mejor estima del daño (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.

Para una intensidad de grado V, el índice de daño medio representativo de todo el distrito del Eixample podría estar comprendido entre la ausencia de daño y el daño *leve* (Figura 5.16).

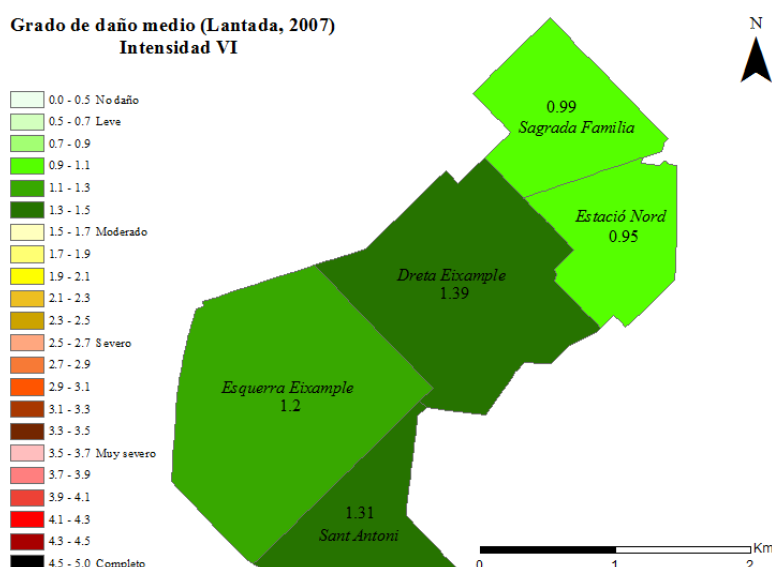
En el programa USERISK no se aplican todos los modificadores de comportamiento y de posición del edificio definidos por Lantada (2007), en consecuencia, en general se obtienen índices de vulnerabilidad de los edificios menores. En la Figura 5.19 se muestran los valores del índice de daño medio obtenidos por Lantada (2007).



**Figura 5.19.** Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad V. Empleando para su cálculo los índices de vulnerabilidad obtenidos por Lantada (2007).

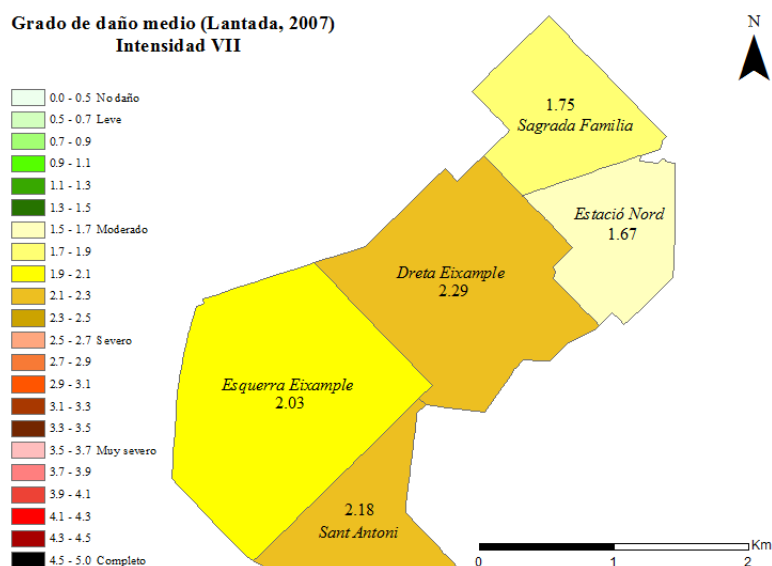
Se puede observar cómo los valores representados en la figura anterior son bastante parecidos a los valores medios del índice de daño medio obtenidos en este trabajo, aunque son ligeramente mayores.

Para la intensidad VI, el índice de daño medio del distrito variaría entre la ausencia de daño y el daño *moderado* (Figura 5.17). Empleando los índices de vulnerabilidad considerados en Lantada (2007), se alcanza un daño *leve* en todos los barrios del distrito, obteniéndose unos valores ligeramente mayores a los calculados en este trabajo para el valor medio (Figura 5.20).



**Figura 5.20.** Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VI. Empleando para su cálculo los índices de vulnerabilidad obtenidos por Lantada (2007).

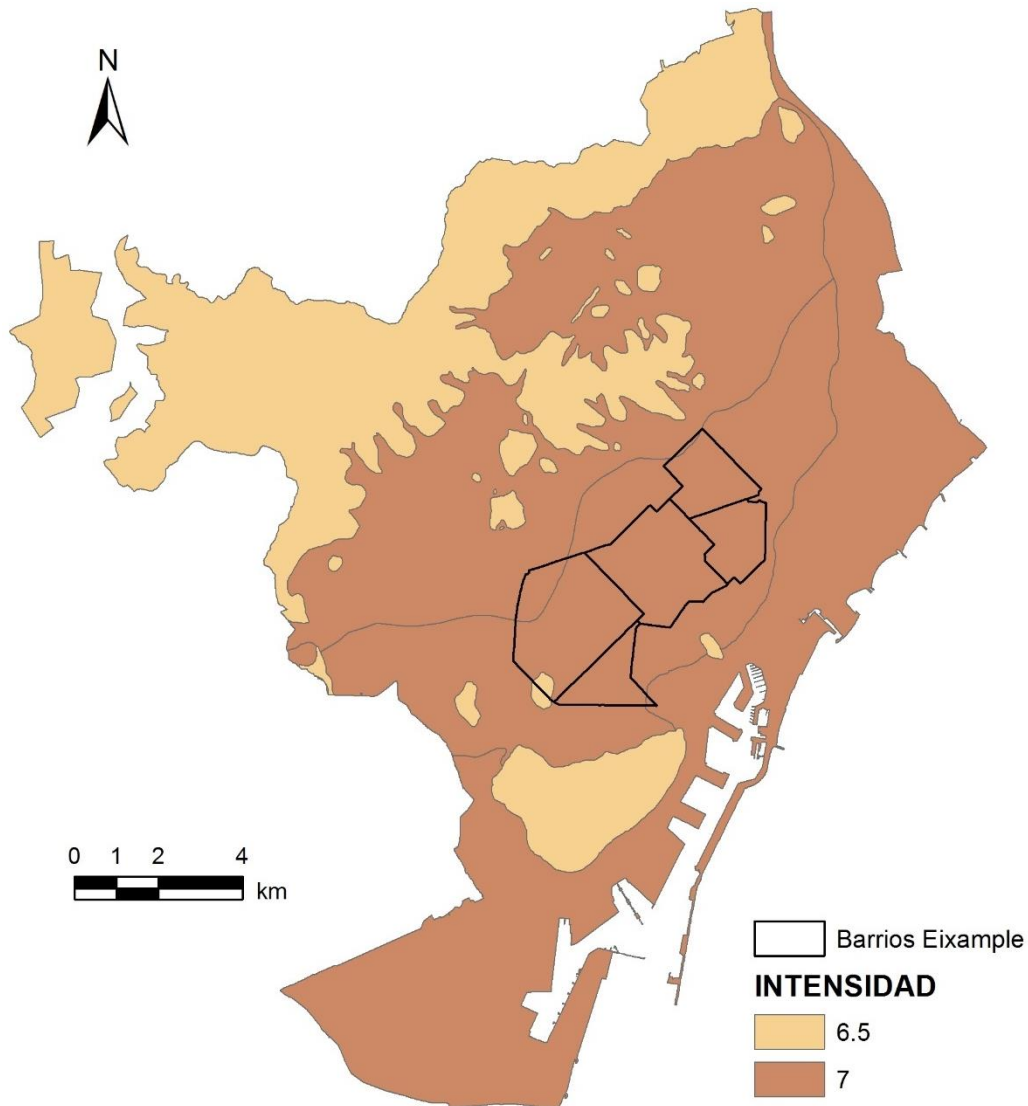
Por último, para la intensidad VII, el daño estaría comprendido entre *leve* y *severo* (Figura 5.18). El valor medio obtenido es un daño *moderado*, que se corresponde con los resultados obtenidos al aplicar los índices de vulnerabilidad considerados por Lantada (2007) (Figura 5.21).



**Figura 5.21.** Representación del índice de daño medio por barrio para un grado de intensidad VII. Empleando para su cálculo los índices de vulnerabilidad obtenidos por Lantada (2007).

Finalmente, se ha podido comprobar en cada uno de los casos que el barrio más vulnerable es el barrio de *Dreta Eixample* y el menos vulnerable el barrio de *Estació Nord*.

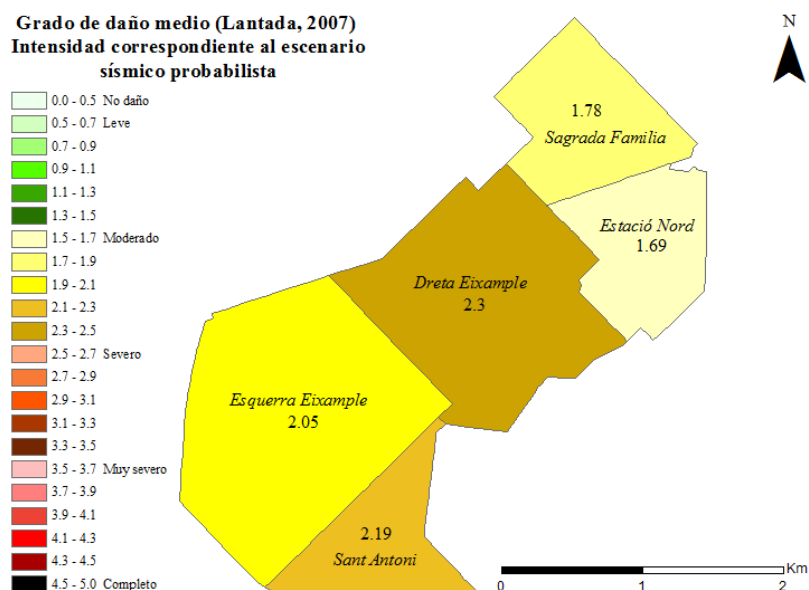
A modo de comprobación, se han comparado los mapas mostrados anteriormente con el mapa que representa el grado de daño medio recogido en Lantada (2007). En esta tesis se emplean los valores de intensidad correspondientes al escenario sísmico probabilista mostrado en la Figura 5.22. La mayor parte de la zona de estudio corresponde a una intensidad 7, mientras que una pequeña parte corresponde a una intensidad de 6,5.



**Figura 5.22.** Escenario sísmico probabilista empleado por Lantada (2007) para el cálculo del índice de daño medio.

Por este motivo, se ha considerado que los resultados obtenidos por Lantada (2007) para este escenario (Figura 5.23) se pueden comparar con los obtenidos en este trabajo para una intensidad VII (Figura 5.18). Se observa como los resultados son prácticamente iguales a los representados en la Figura 5.21, alcanzándose un daño *moderado* en todos los barrios del distrito del *Eixample*.





**Figura 5.23.** Índice de daño medio por zonas censales de Barcelona para un escenario sísmico probabilista (Lantada, 2007).

#### 5.4.2. Costes económicos

Se ha hecho una estimación, de forma aproximada, de los costes económicos directos en cada uno de los barrios del distrito del *Eixample*, incluyendo el coste de restitución del continente y del contenido de los edificios dañados. Esta estimación se ha realizado para los grados de intensidad V, VI y VII. Para realizar el cálculo se ha considerado que el coste del m<sup>2</sup> de reposición del edificio es el mismo para todas las tipologías. Se ha empleado un valor de 950,47 €/m<sup>2</sup>, correspondiente a la construcción de un edificio de hormigón armado con forjados reticulares y destinado a uso residencial plurifamiliar de clase media, extraído del Boletín Económico de la Construcción (2015).

Los costes económicos directos mínimos, medios y máximos esperados en cada barrio, considerando una correcta definición de la tipología estructural (*Best-σ*, *Best*, *Best+σ*), se recogen en las Tablas 5.10, 5.11 y 5.12. En estas tablas se recoge tanto el coste de restitución del continente como del contenido de los edificios dañados.

Por último, se han representado cartográficamente los costes de restitución de la estructura o del continente de los edificios dañados, estimados para los distintos grados de intensidad (Figuras 5.24, 5.25 y 5.26).

**Tabla 5.10.** Costes mínimos de rehabilitación, deterioro y totales en todos los barrios del distrito del Eixample y para distintos grados de intensidad, considerando una correcta definición de las tipologías estructurales de los edificios (*Best- $\sigma$* ).

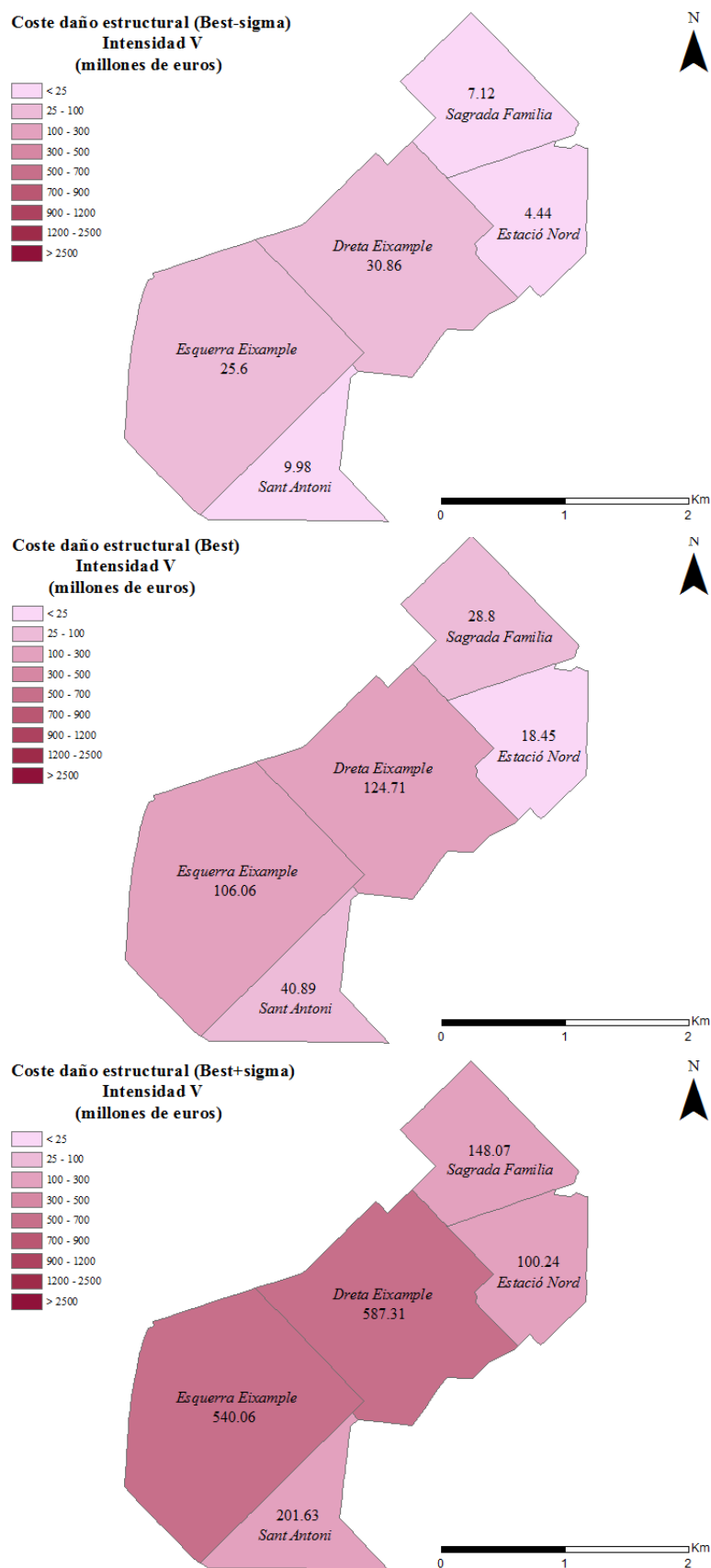
Barrios	<i>Best-<math>\sigma</math></i> (percentil del 16%)								
	I=V			I=VI			I=VII		
	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)
<b>0201: Dreta Eixample</b>	30,86	15,43	46,29	103,94	51,97	155,91	375,27	187,63	562,90
<b>0202: Esquerra Eixample</b>	25,60	12,80	38,41	85,05	42,52	127,57	303,18	151,59	454,77
<b>0203: Estació Nord</b>	4,44	2,22	6,66	14,39	7,20	21,59	50,81	25,40	76,21
<b>0204: Sagrada Família</b>	7,12	3,56	10,68	23,11	11,56	34,67	81,76	40,88	122,64
<b>0205: Sant Antoni</b>	9,98	4,99	14,98	33,52	16,76	50,27	119,52	59,76	179,28
<b>Total</b>	78,01	39,01	117,02	260,01	130,00	390,01	930,54	465,27	1395,81

**Tabla 5.11.** Costes medios de rehabilitación, deterioro y totales en todos los barrios del distrito del Eixample y para distintos grados de intensidad, considerando una correcta definición de las tipologías estructurales de los edificios (Best).

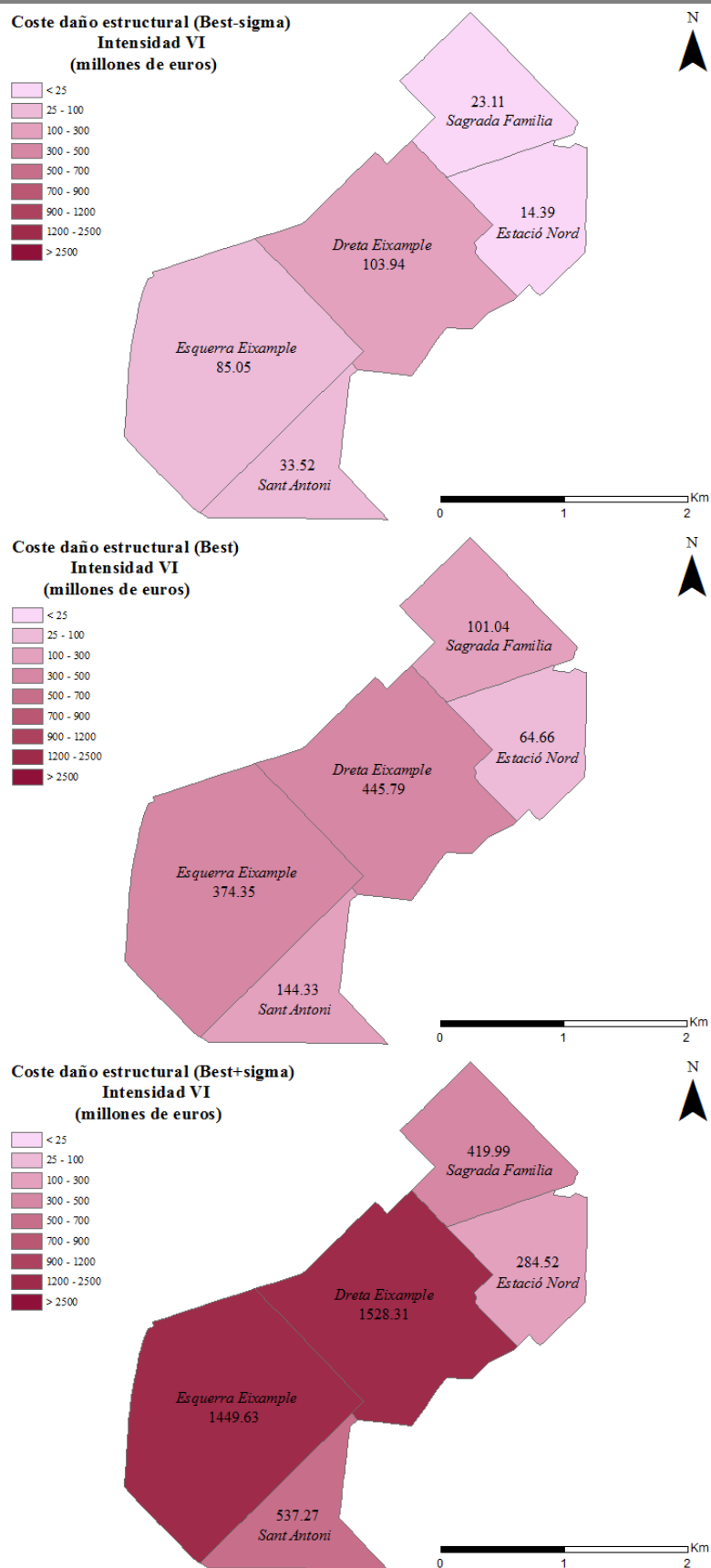
Barrios	Best (percentil del 50%)								
	I=V			I=VI			I=VII		
	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)
<b>0201: Dreta Eixample</b>	124,71	62,36	187,07	445,79	222,89	668,68	1250,68	625,34	1876,01
<b>0202: Esquerra Eixample</b>	106,06	53,03	159,10	374,35	187,18	561,53	1064,42	532,21	1596,63
<b>0203: Estació Nord</b>	18,45	9,22	27,67	64,66	32,33	96,99	191,39	95,69	287,08
<b>0204: Sagrada Família</b>	28,80	14,40	43,19	101,04	50,52	151,56	298,29	149,15	447,44
<b>0205: Sant Antoni</b>	40,89	20,45	61,34	144,33	72,17	216,50	404,87	202,44	607,31
<b>Total</b>	318,91	159,45	478,36	1130,18	565,09	1695,27	3209,65	1604,82	4814,47

**Tabla 5.12.** Costes máximos de rehabilitación, deterioro y totales en todos los barrios del distrito del Eixample y para distintos grados de intensidad, considerando una correcta definición de las tipologías estructurales de los edificios ( $Best+\sigma$ ).

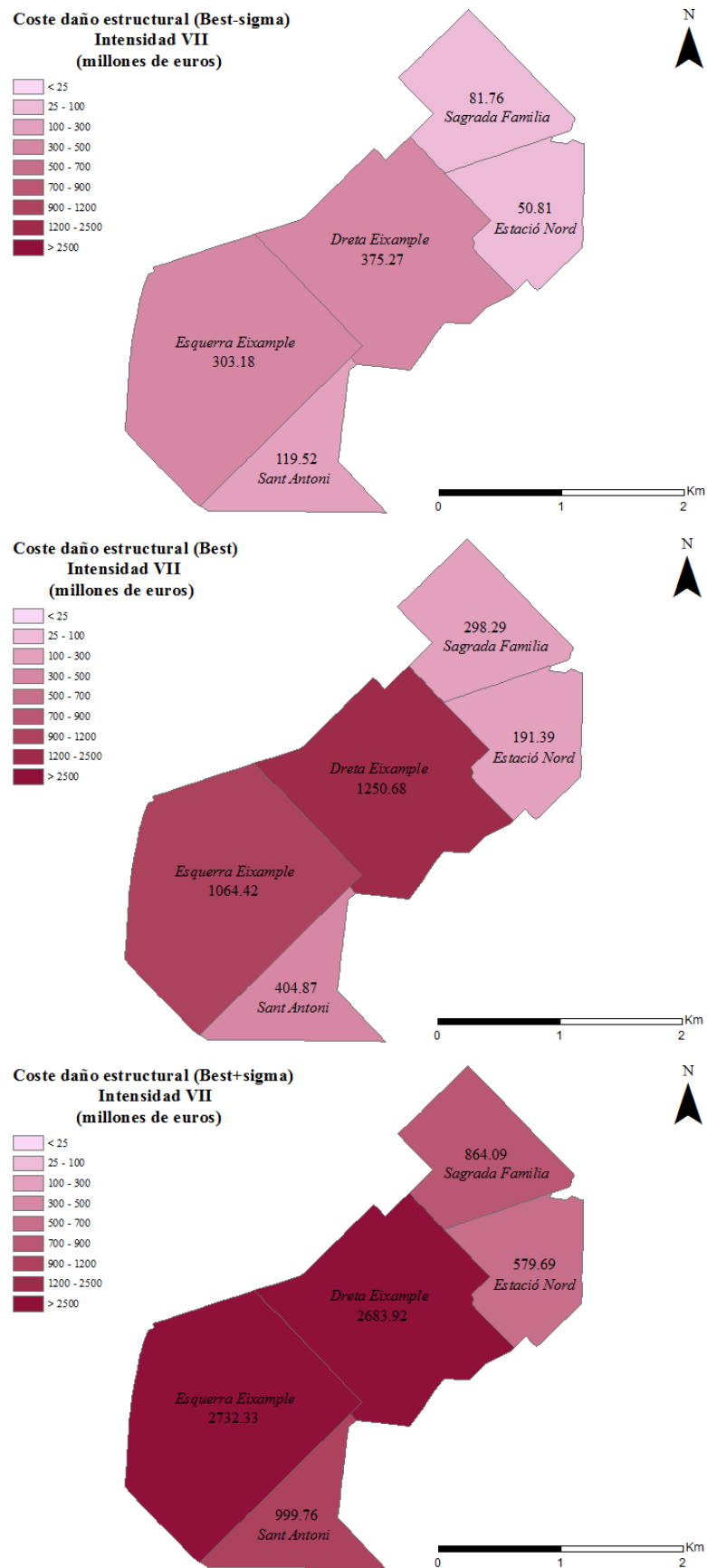
Barrios	$Best+\sigma$ (percentil del 84%)								
	I=V			I=VI			I=VII		
	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)	Coste daño estructural (millones de €)	Coste contenido edificios (millones de €)	Coste total (millones de €)
<b>0201: Dreta Eixample</b>	587,31	293,66	880,97	1528,31	764,15	2292,46	2683,92	1341,96	4025,88
<b>0202: Esquerra Eixample</b>	540,06	270,03	810,08	1449,63	724,82	2174,45	2732,33	1366,16	4098,49
<b>0203: Estació Nord</b>	100,24	50,12	150,36	284,52	142,26	426,78	579,69	289,85	869,54
<b>0204: Sagrada Família</b>	148,07	74,04	222,11	419,99	210,00	629,99	864,09	432,05	1296,14
<b>0205: Sant Antoni</b>	201,63	100,81	302,44	537,27	268,63	805,90	999,76	499,88	1499,63
<b>Total</b>	1577,31	788,66	2365,97	4219,71	2109,86	6329,57	7859,79	3929,89	11789,68



**Figura 5.24.** Representación de los costes debidos al daño estructural por barrio para un grado de intensidad V. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y el valor más probable (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.



**Figura 5.25.** Representación de los costes debidos al daño estructural por barrio para un grado de intensidad VI. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y el valor más probable (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.



**Figura 5.26.** Representación de los costes debidos al daño estructural por barrio para un grado de intensidad VII. Se muestra el valor máximo (abajo), mínimo (arriba) y el valor más probable (en medio), considerando una correcta definición de la tipología estructural.

En las figuras anteriores, se puede observar cómo en el barrio de *Dreta Eixample* se esperan los mayores costes de reparación, y los menores se esperan en el barrio de *Estació Nord*. En estos dos barrios se ha obtenido el mayor y el menor índice de daño medio, respectivamente. Además, el número de edificios localizados en el barrio de *Dreta Eixample* es, aproximadamente, tres veces mayor que el número de edificios localizados en el barrio de *Estació Nord*. Por esta razón, tiene sentido las grandes diferencias obtenidas en los costes.

Para una intensidad de grado V, en el barrio de *Dreta Eixample*, se obtiene que los costes estarían comprendidos entre 30,86 y 587,31 millones de euros, con un valor medio de 124,71 millones de euros. Para una intensidad de grado VI, los costes variarían entre 103,94 y 1528,31 millones de euros, con un valor medio de 445,79 millones de euros. Por último, considerando una intensidad de grado VII, los costes de reparación estarían comprendidos entre 375,27 y 2683,92 millones de euros, con un valor medio de 1250,68 millones de euros.

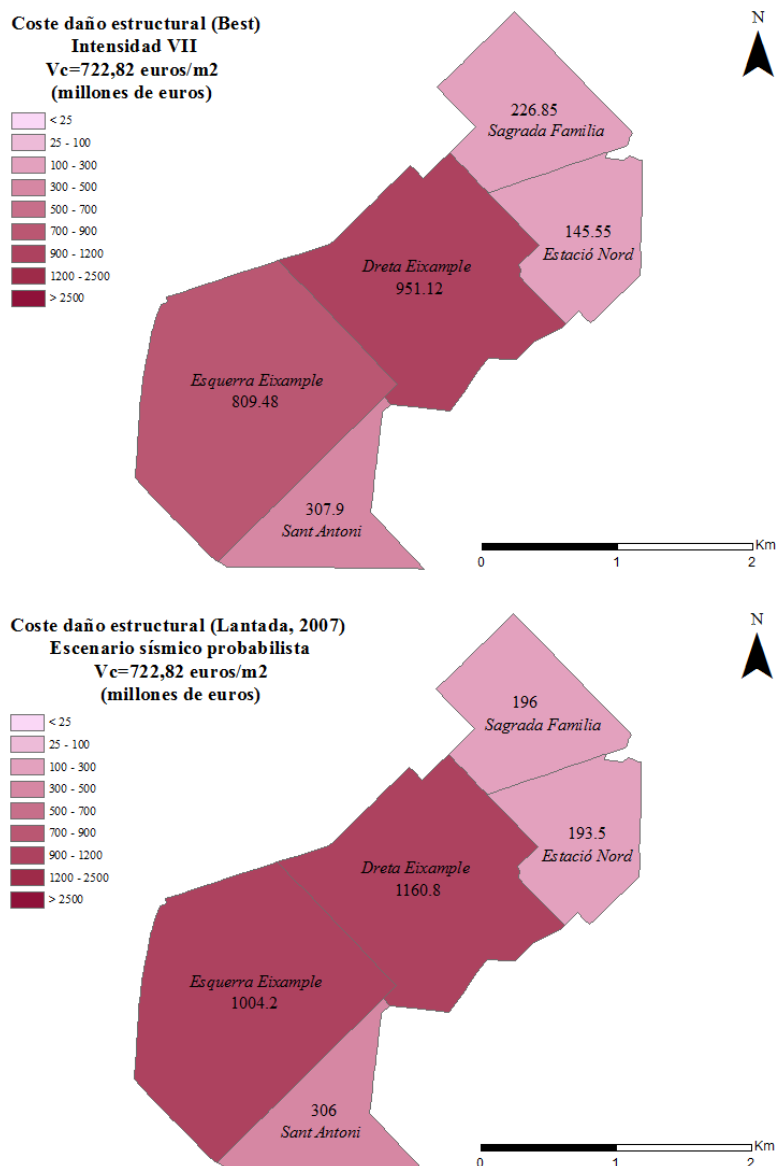
A modo de comprobación, se han calculado los costes medios para una intensidad de grado VII, empleando el valor del coste del m<sup>2</sup> utilizado por Lantada (2007). De tal forma, que sea posible comparar los resultados obtenidos. El valor empleado por Lantada es de 722,82 €/m<sup>2</sup>, correspondiente al precio de un edificio residencial de clase media y de hormigón armado en el año 2005.

Se puede observar cómo en tres de los barrios (Figura 5.27), Lantada (2007) obtiene costes de daño estructural mayores. Sin embargo, en los otros dos barrios, obtiene unos costes ligeramente menores. Esto se debe a que, como se ha comentado antes, el programa USERISK no aplica todos los modificadores posibles en el cálculo del índice de vulnerabilidad. Por esta razón, se obtienen índices de vulnerabilidad e índices de daño medio distintos. Además, Lantada emplea un escenario sísmico probabilista para el cálculo de estos costes, es decir, no emplea un solo grado de intensidad sísmica. La mayor parte del terreno sobre el que se encuentran los edificios de estudio, se caracteriza con una intensidad sísmica de grado 7. Sin embargo, una pequeña zona se caracteriza con una intensidad 6,5 (Figura 5.22).

No obstante, los resultados son similares y se consideran razonables. Aun así, se ha calculado el coste en uno de los barrios, empleando para ello los índices de



vulnerabilidad calculados por Lantada (2007). Finalmente, se ha obtenido un valor muy parecido.



**Figura 5.27.** Comparación de los costes debidos al daño estructural obtenidos en este trabajo (arriba) con los obtenidos por Lantada (2007) (abajo).

### 5.4.3. Pérdidas humanas

La precisión en la estimación del número de víctimas depende de la precisión en la determinación de los parámetros que intervienen en su cálculo. En primer lugar, se recogen los valores adoptados para cada uno de los parámetros.

El primer parámetro es el número de edificios colapsados,  $C$ . Se ha calculado multiplicando el número de edificios de cada clase por la probabilidad de colapso obtenida en cada uno de los barrios (Tabla 5.13).

**Tabla 5.13.** Cálculo del parámetro  $C$  para cada tipología estructural y cada barrio del distrito del Eixample, empleado en la estimación del número de víctimas.

Barrios	$C_{\text{mampostería}}$	$C_{\text{hormigón}}$
<b>0201: Dreta Eixample</b>	62,2	0,1
<b>0202: Esquerra Eixample</b>	69,4	0,4
<b>0203: Estació Nord</b>	9,9	0,1
<b>0204: Sagrada Família</b>	25,0	0,1
<b>0205: Sant Antoni</b>	31,1	0,1

La determinación del parámetro  $M1$  es un poco más complicada. Este parámetro hace referencia al número de personas que habitan en un edificio y es diferente en cada tipología estructural. Para obtenerlo, primero se ha estimado el porcentaje de viviendas correspondientes a cada tipología. Este porcentaje depende del número de edificios de cada tipología, de su altura media y de la superficie edificada (Tabla 5.14). Se puede observar cómo hay mayor número de edificios de mampostería, pero la altura media es mayor en los edificios de hormigón armado. Finalmente, se ha obtenido que el 70% de las viviendas localizadas en el distrito del Eixample son de mampostería y el 30% de hormigón armado.

**Tabla 5.14.** Cálculo del porcentaje de viviendas correspondientes a las tipologías de mampostería y hormigón armado, para la estimación del parámetro  $M1$ .

	Edificios de mampostería	Edificios de hormigón
<b>Número de edificios</b>	6300	2003
<b>Altura media (m)</b>	6,21	8,38
<b>Superficie total (millones de m<sup>2</sup>)</b>	8,84	6,66
<b>Porcentaje</b>	0,70	0,30

A continuación, se ha consultado el número de viviendas registradas en el 2001 en el Instituto de Estadística de Cataluña. Existen datos más recientes, sin embargo, la base de datos empleada es más antigua. Con este dato se ha calculado el número de personas por vivienda y el número de viviendas de cada tipología estructural, empleando los porcentajes definidos anteriormente. Por último, se ha calculado el parámetro M1, multiplicando el número de viviendas dentro del edificio por el número de personas que habitan en cada vivienda (Tabla 5.15).

**Tabla 5.15.** Estimación del parámetro M1 para cada tipología estructural, empleado en el cálculo de víctimas.

	Edificios de mampostería	Edificios de hormigón
<b>Número de edificios</b>	6300	2003
<b>Población</b>	182107	78130
<b>Número de viviendas</b>	72776	31224
<b>Número de personas por vivienda</b>	2,50	2,50
<b>M1</b>	28,91	39,01

Se ha obtenido que el número de personas por vivienda es de 2,50, valor bastante parecido al considerado por Lantada (2007) en la estimación del número de fallecidos en Barcelona. En el cual se considera que el número de personas por vivienda es de 2,52. El parámetro M1 obtenido es bastante mayor al obtenido por Lantada. Esto se debe a que los edificios del *Eixample* son de bastante altura y, por consiguiente, hay mayor densidad de población en esta zona.

El resto de parámetros empleados en el cálculo de heridos y fallecidos se recogen en la tabla 5.16. Estos valores se han elegido según las recomendaciones de Vacareanu et al. (2004) y de Coburn y Spence (1992) y son los empleados por Lantada (2007) en el cálculo de víctimas en Barcelona.

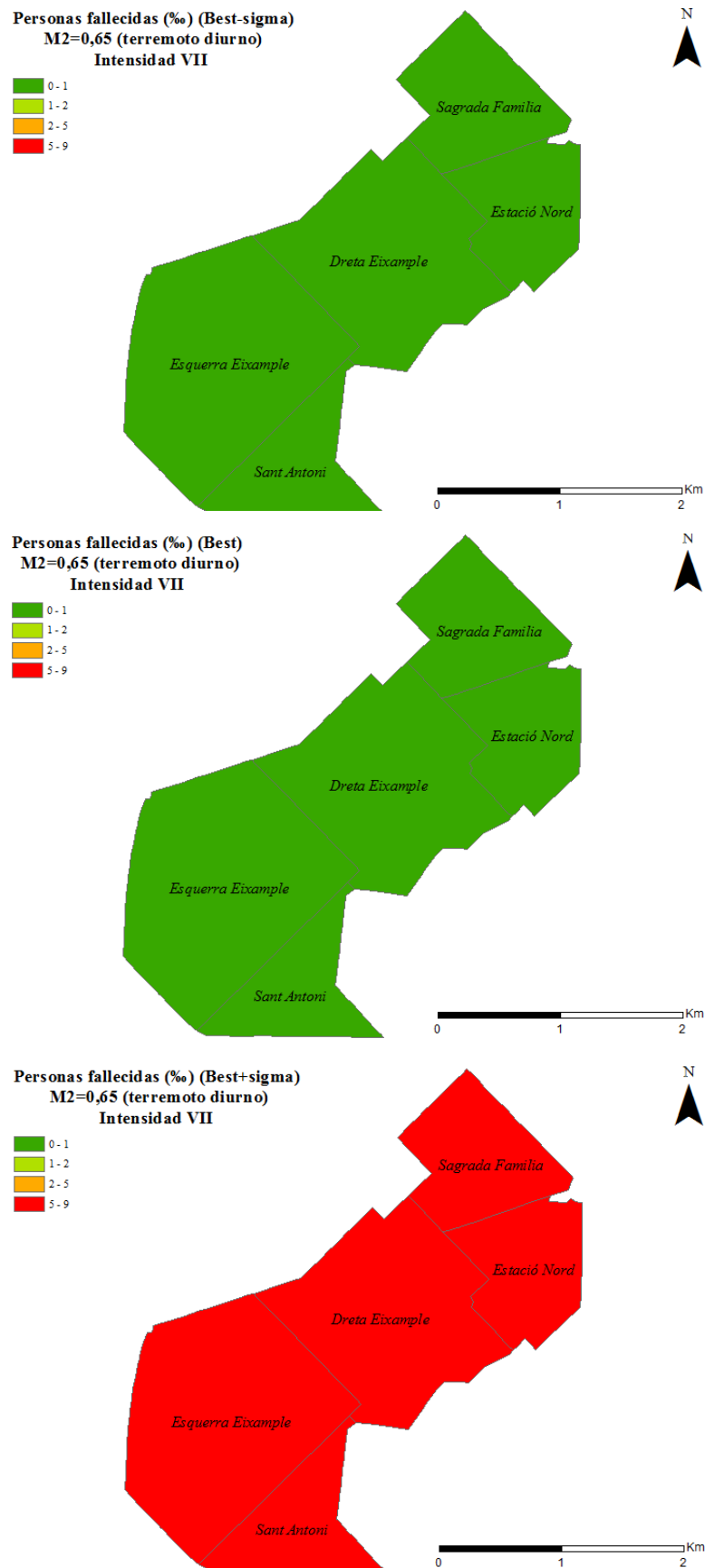
**Tabla 5.16.** Parámetros M2, M3, M4 y M5 para cada tipología estructural, empleados en el cálculo de víctimas.

	M2 (%)	M3 (%)	M4 (%)				M5 (%)
			Heridos leves	Heridos que requieren hospitalización	Heridos graves	Fallecidos directos	
Edificios de mampostería	65	5	30	30	25	15	60
Edificios de hormigón armado	65	50	10	40	10	40	90

El parámetro M2 representa el porcentaje de ocupación en el momento del terremoto. Se ha tomado un valor medio de 0,65, valor inferior al porcentaje de ocupación nocturna, que es 0,8. Por otro lado, el parámetro M3 es el porcentaje de ocupantes del edificio que quedan atrapados por su colapso. Este parámetro sólo está definido para una intensidad VII en la escala EMS-98, por lo que no es posible hacer una estimación de víctimas para los grados de intensidad menores. En cuanto al parámetro M4 es el porcentaje de personas atrapadas que sufrirán cada tipo de daño (heridos leves, heridos que requieren hospitalización, heridos graves y fallecidos directos). Por último, el parámetro M5 es el porcentaje de mortalidad después del terremoto, este parámetro solo se considera en la estimación del número de fallecidos, en la estimación del resto de víctimas es igual a cero.

En la Figura 5.28 se representa el número de personas fallecidas (en ‰) estimado con los parámetros anteriores. Se ha obtenido para los valores de daño máximo (percentil del 84%), mínimo (percentil del 16%) y medio (percentil del 50%), suponiendo que la definición de la tipología estructural de los edificios es la correcta ( $Best+\sigma$ ,  $Best-\sigma$ ,  $Best$ ). De tal forma que se pueden visualizar las posibles consecuencias que puede tener un sismo de intensidad VII, considerando distintos niveles de daño en los edificios.

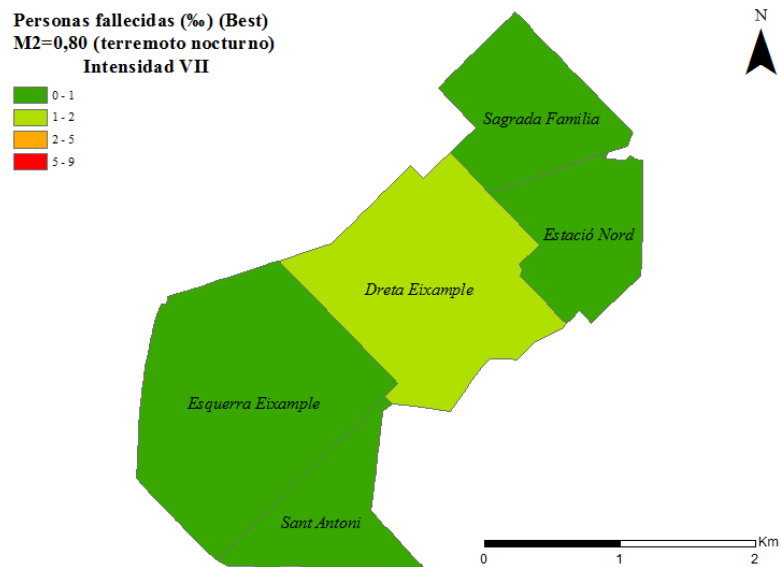
En primer lugar, hay que recordar que estos cálculos son una aproximación del posible escenario de víctimas. Es muy complicado saber cuántas personas va a haber en la zona afectada y dónde se van a localizar en el momento del terremoto.



**Figura 5.28.** Estimación del número de fallecidos ocasionados por un terremoto de intensidad VII, que sucede durante el día. Para un valor de daño mínimo (arriba), medio (en medio) y máximo (abajo).

Como resultado se ha obtenido que, para el daño medio y mínimo, el número de fallecidos en todos los barrios sería menor a 1 de cada 1000 habitantes. Mientras que, para el daño máximo, el número de fallecidos en cada barrio estaría comprendido entre 5 y 9 de cada 1000 habitantes. Este último resultado parece demasiado alto, pero representa valores extremos.

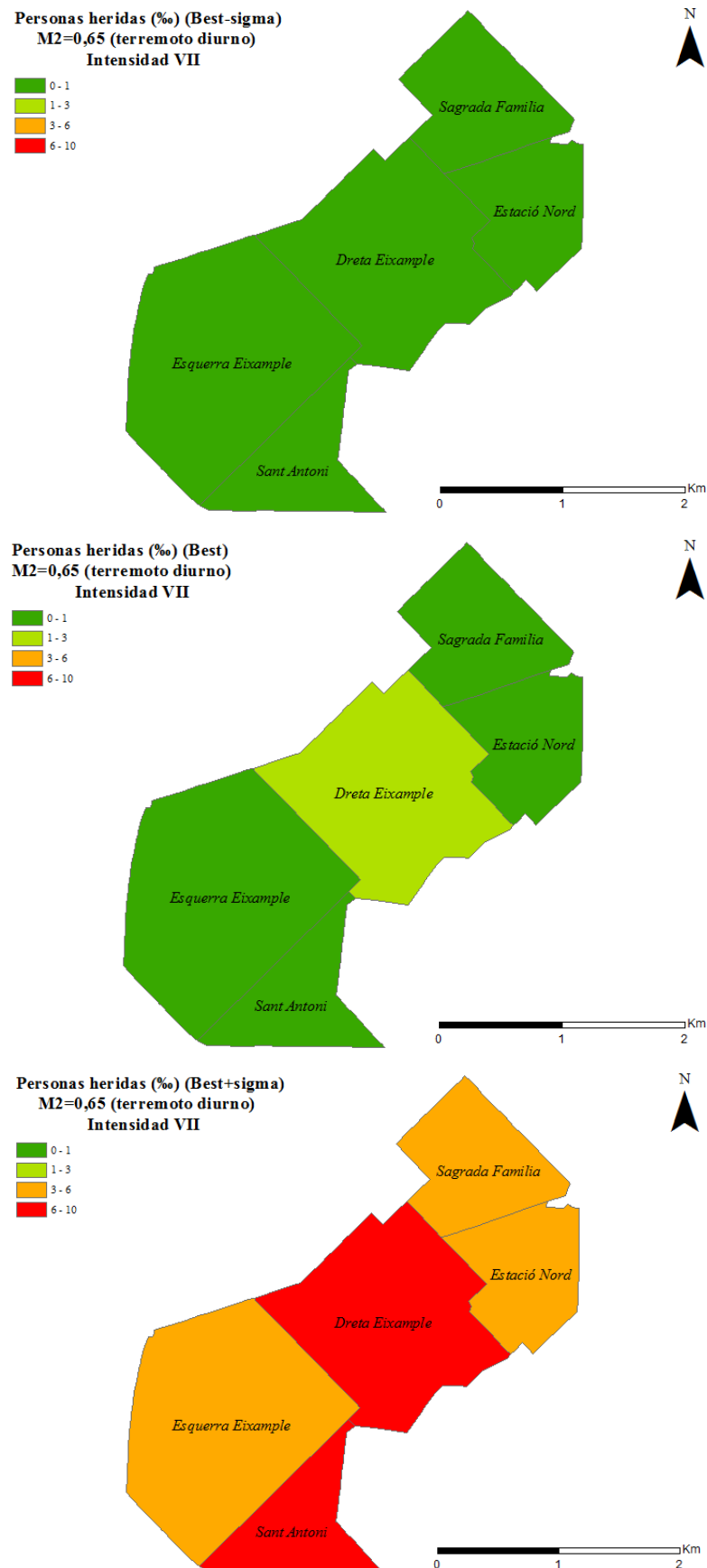
En los resultados comentados anteriormente, se ha tomado como premisa que el terremoto sucede durante el día, pero si el terremoto sucediera por la noche, el número de fallecidos aumentaría. En la Figura 5.29 se ha estimado el número de fallecidos para el valor medio del daño, considerando que el terremoto sucede por la noche. Se comprueba cómo el número de fallecidos aumenta considerablemente.



**Figura 5.29.** Estimación del número de fallecidos ocasionados por un terremoto de intensidad VII, que sucede durante la noche. Para un valor de daño medio.

Por último, se ha estimado el número de heridos totales. En el que se incluyen los heridos graves, heridos que requieren hospitalización y heridos leves. Los resultados se muestran en la Figura 5.30.

Se observa cómo, para el daño mínimo, el número de heridos en cada barrio sería menor a 1 de cada 1000 habitantes. Sin embargo, para el daño medio, el número de heridos en uno de los barrios sería mayor a esta cifra. Finalmente, para el daño máximo, el número de heridos aumentaría bastante, aproximándose mucho a 9 fallecidos por cada 1000 habitantes en uno de los barrios.



**Figura 5.30.** Estimación del número de heridos totales ocasionados por un terremoto de intensidad VII, que sucede durante el día. Para un valor de daño mínimo (arriba), medio (en medio) y máximo (abajo).

Las cifras de víctimas obtenidas son imprecisas y varían mucho según se considere el valor medio del daño o sus valores límites. Pero es interesante hacer este análisis porque permite visualizar en qué barrios del distrito se espera mayor número de víctimas y entre qué intervalo de valores puede estar comprendido este número. De tal forma que, es posible diseñar un plan de emergencias, habilitando hospitales en las zonas más afectadas.

Los barrios de *Dreta Eixample* y *Esquerra Eixample* son los más afectados, debido a que en estos dos barrios hay mayor número de edificios. Además, son dos de los tres barrios en los que se han obtenidos mayores índices de daño medio. El barrio que menor número de víctimas obtiene es el barrio de *Estació Nord*, en el cual hay menor número de edificios y, además, se ha obtenido un índice de daño medio menor.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) permite evaluar el riesgo sísmico de grandes zonas urbanas de forma sencilla, si se conocen las características geométricas, estructurales y de situación de los edificios localizados en la zona de estudio. Por otro lado, el programa USERISK 2011 permite aplicar este método en la estimación del riesgo sísmico de cientos o miles de edificios de forma rápida y sistemática. En concreto, es posible aplicar la metodología LM1 definida por el proyecto Risk-UE o la metodología probabilista LM1\_P propuesta por Aguilar (2011).

Como norma general, los escenarios de riesgo sísmico se obtienen para una probabilidad de excedencia del 50%, es decir, existe un 50% de probabilidades de que el daño registrado en la zona urbana de estudio sea menor. Sin embargo, existen grandes incertidumbres en la determinación de las características de los eventos sísmicos futuros y del comportamiento de las estructuras ante éstos. Por esta razón, es recomendable realizar el análisis de riesgo sísmico de forma probabilista. En esta tesina, además del percentil 50, se han seleccionado los percentiles 16 y 84 para analizar los daños físicos, los costes económicos y las pérdidas humanas ocasionadas por sismos de distintas intensidades, según un intervalo de confianza del 68%. Esto quiere decir que existe un 16% de posibilidades de que el daño sea menor al valor mínimo considerado y otro 16% de que sea mayor al valor máximo. Como consecuencia, se obtienen valores de daño extremos, pero que deberían tenerse en cuenta en la toma de decisiones respecto a la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios en zonas urbanas.

Aunque la amenaza sísmica de la ciudad de Barcelona se considera como baja o moderada, los resultados de riesgo sísmico obtenidos no son despreciables. Esto se debe a que los edificios de la zona urbana de estudio son bastante vulnerables, ya que una gran parte están representados con un índice de vulnerabilidad cercano a la unidad.

Según Lantada (2007), la mayor parte del terreno sobre el que se localiza el distrito del *Eixample* se representa con una intensidad VII (figura 7.22). Para esta intensidad y considerando una correcta definición de la tipología estructural (*Best*), se obtiene un índice de daño medio *leve* para el percentil 16, *moderado* para el percentil 50 y *severo* para el percentil 84. Estos valores de daño son suficientemente elevados como para plantear medidas que reduzcan la vulnerabilidad de los edificios más afectados.

Consecuentemente, los costes económicos totales para el percentil 50, calculados como la suma de los costes de restitución del continente y del contenido, serían de 4814 millones de euros. Esta cifra es aproximadamente el doble del presupuesto del Ayuntamiento de Barcelona para este año. De tal forma que los costes económicos directos en todos los distritos de Barcelona serían demasiado elevados, viéndose sometida la ciudad a un largo periodo de recuperación. Este periodo de recuperación sería más largo aún si se analizan los costes económicos totales para el percentil 84, obteniéndose un valor de 11790 millones de euros.

En cuanto a la estimación del número de víctimas ocasionadas por un sismo de dicha intensidad, es muy imprecisa. Para el percentil 50 y considerando que el sismo sucede por el día, el número de fallecidos en cada uno de los barrios del distrito de estudio sería menor a 50. Sin embargo, si se considerara el percentil 84 el número de fallecidos aumentaría mucho, llegando a más de 500 fallecidos en uno de los barrios. Estos valores se deberían emplear para definir planes de emergencia ante el posible desastre, aunque son inexactos y generalmente conservativos, sirven para saber entre qué intervalo de valores puede estar comprendida esta cifra y en qué lugar se espera mayor número de víctimas.

No obstante, aunque la base de datos tiene una alta fiabilidad, la información contenida en la misma está actualizada al año 1996. Sería conveniente revisar y actualizar toda esta información. De tal forma que las incertidumbres asociadas a los datos de partida se reducirían y las curvas *Lower*, *Best* y *Upper* estarían más próximas. Además, existen ciertos modificadores del comportamiento que, por el momento, no están implementados en el programa USERISK. Este hecho no tiene mucha importancia, pero sería aconsejable introducirlos para caracterizar la vulnerabilidad de los edificios de la manera más realista posible.

Finalmente, se recomienda aplicar este método a otras zonas urbanas con un nivel de amenaza sísmica importante, debido a la riqueza de la información que aporta este método probabilista. Sería interesante seleccionar una ciudad que se haya visto afectada por un terremoto de bastante importancia. Como, por ejemplo, el municipio de Amatrice, el cual recientemente ha sido devastado por un sismo de magnitud  $M_w$  igual a 6,2, según el USGS. Si se hiciera un estudio de los edificios que había antes del terremoto y se empleara este método para estimar el riesgo sísmico, sería posible

comparar los resultados con los daños físicos experimentados en la realidad. Asimismo, se podrían comparar los costes económicos y el número de víctimas. De esta forma sería posible ajustar mejor este método.

Sin embargo, en ocasiones, no es tan sencillo adecuar el programa USERISK 2011 a otra zona urbana distinta a Barcelona, ya que es necesario disponer de la curva de peligrosidad sísmica de la ciudad de estudio. Además, el programa aplica los modificadores regionales correspondientes a Barcelona y los modificadores de comportamiento explicados en el capítulo de metodología, sin posibilidad de elegir qué modificadores se aplican. No obstante, se está trabajando en una nueva versión del programa, en la que se solucionan algunos de estos problemas, facilitando su aplicación a otras áreas urbanas.

## REFERENCIAS

- Aguilar Meléndez, A. (2011). *Evaluación probabilística del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas*. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña.
- ATC-13 (1985). *Earthquake damage evaluation data for California*. ATC Applied Technology Council. Redwood City, California.
- ATC-25 (1991). *Seismic Vulnerability and impact of disruption on lifelines in the coterminous United States*. Applied Technology Council. Redwood City, California.
- Boletín Económico de la Construcción (2015). Año 76 1r. trimestre. No. 301 febrero 2015.
- Cid, J. (1998). *Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales*. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Cid, J., Susagna, T., Goula, X., Chavarria, L., Figueras, S., Fleta, J., Casas, A. y Roca, A. (2001). *Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects*. Pure Applied Geophysics 158: 2559-2577.
- Coburn, A. y Spence, R. (1992). *Earthquake Protection*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Coburn, A. y Spence, R. (2002). *Earthquake Protection (2nd edition)*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- FEMA (1992). *Handbook for the seismic evaluation of the existing buildings*. FEMA 178. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.
- FEMA (2000). *HAZUS 99 Estimated annualized earthquake losses for the United States*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.
- FEMA (2009). *HAZUS® MH MR4. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.

- Giovinazzi, S. (2005). *The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis*. Tesis doctoral. The Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Brannschweig, and The Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. Florence, Italy.
- Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg.
- Lantada, N. (2007). *Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Tesis doctoral. Dto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. <http://www.tesisenred.net/handle/10803/6259>
- McCormack, T. C. y Rad, F. N. (1997). *Earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21*. Earthquake Spectra 13 (4): 605-621.
- Milutinovic, Z. V. y Trendafiloski, G. S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings. RISK-EU Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje.
- NCSE-02. (2009). *Norma de Construcción Sismorresistente Española: Parte General y de Edificación*, Comisión Permanente de Normas Sismorresistente, Real Decreto 997/2002 del 27 de septiembre de 2002, Boletín Oficial del Estado nº 244, viernes 11 de octubre de 2002. Ministerio de Fomento.
- Roca, A. (2004). *RISK-UE WP08 Application to Barcelona. RISK-EU Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. Contract No. EVK4-CT-2000-00014
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca, A. (2004). *Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain integrating uncertainties*. Journal of Seismology 8 (1): 24-40.
- UNDRO (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis. Report of Expert Group Meeting*. Geneve.

